

近自由面非定常空化流动特征与稳定性机理研究

王一伟, 徐畅, 黄荐, 黄晨光

(中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京, 100190;
中国科学院大学工程科学学院, 北京, 100049;)

摘要: 近自由面非定常空化流动是水面航行器提高航速的重要障碍, 主要表现为自由面/空化区相互作用, 影响空泡的非稳态特征, 空化流动的兴波效应也值得关注。以往研究大多针对定常问题, 非定常的算法及实验验证手段的报道很少。本研究建立了水/气/汽三相并包含空化相变效应的大涡模拟数值方法, 基于小尺寸水下发射水箱完成了典型的验证实验。计算得到的非定常空泡形态演化与实验结果吻合良好, 验证了计算方法的精度和可靠性。在此基础上, 分析了空泡形态非稳态演化的特征与自由面/空化相互作用规律, 讨论了自由面对空泡流动的约束效果和非稳态空泡的兴波效应。进一步改变不同的浸没深度, 发现在航行体距离自由表面非常接近的情况下, 会发生通气云状空泡和通气超空泡现象。在通气效应和回射流变薄两种因素的影响下, 空泡在距离自由表面更近的条件下能够变得更稳定, 自由面可能对空泡发展和稳定性产生整体的影响, 值得未来进一步深入研究并探索工程应用的前景。

关键词: 非稳态空泡; 水箱实验; 大涡模拟; 自由液面

1 引言

为了维护形势日益严峻的海洋权益, 小型、高速水面航行器已逐渐成为未来海洋体系的发展重要组成部分。未来高速航行器的发展方向是集气—水—动一体化的近水面设计, 该类型航行器由水下浮体部件、水翼部件和水面支撑部件组成。当关键部件位于自由面附近时, 空化现象有可能受到自由面的影响而改变^[1-3], 因此需要针对近自由面空化这一新问题专门开展研究。通过水洞^[4]、水箱实验^[5]结合气水两相空化相变数值模型及大涡模拟方法^[3, 6-9]可以得到空泡内部回射流及空泡脱落云等结构的特征和运动规律^[10-12]。

在水下非稳态云状空化流动研究的基础上, 建立了含自由面的水—汽—气三相云状空

泡流动大涡模拟方法，开展了典型水下回转体近自由面空化的数值计算，并基于水下发射机理性实验结果进行了验证。研究了自由面影响下，空泡非轴对称非定常演化特征，得到了自由面对回射流动和空泡脱落的影响机制。并进一步讨论了不同液面高度对空泡发展的影响规律。在一定深度范围内，自由液面可以使空泡形态更加稳定。在航行体距离自由表面非常接近的情况下，会发生通气云状空泡和通气超空泡现象。

2 水箱实验

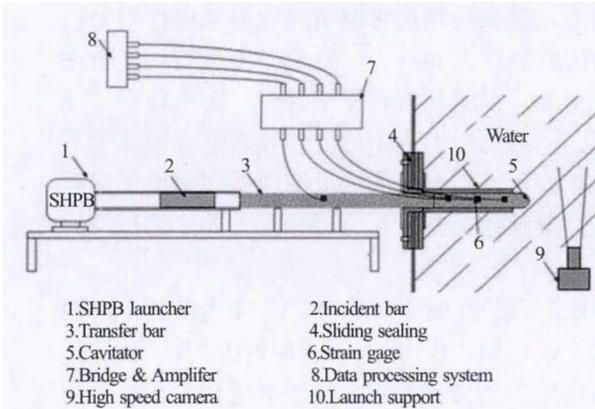


图1 实验原理与系统构造

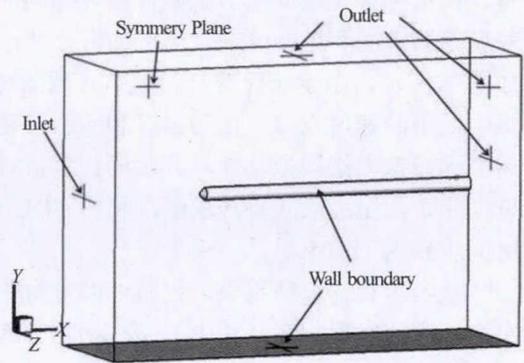


图2 计算域及边界条件设置

水平发射系统基于分离式霍普金森压杆发射技术^[5]，以敞口水箱作为发射容器。实验的原理和系统构造图如图1所示。在本实验装置中，通过 SHPB 发射器产生压力波，通过传递杆传递至 $2\text{m} \times 1\text{m} \times 0.8\text{m}$ 的水箱内部的模型中实现模型发射。该装置能够在 $200\mu\text{s}$ 内将模型加速至 30m/s ，满足了非稳态空化实验的速度需要。

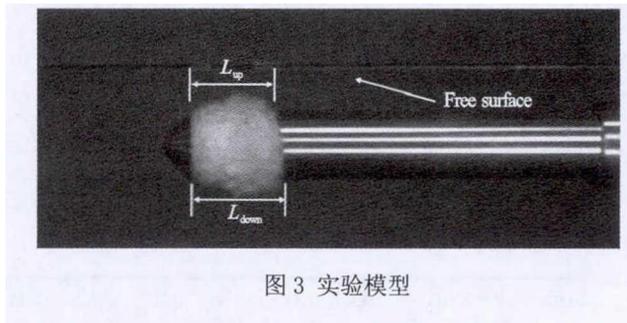


图3 实验模型

图3为实验用模型，为一不锈钢材料的细长钝头圆柱体。模型总长度为246毫米，直径为37mm。锥角为 90° 。实验中使用高速摄像机以25000 fps的频率获得空泡形态照片。

在典型的大气环境压力实验中，航行器与自由表面之间的距离为 17mm，发射速度约为 17.8m/s，水温为 20°C，对应的空化数为 0.62。可以清楚地看出自由表面对空泡长度的影响，航行器上下两侧的空泡长度出现明显的差异。

3 数值模拟

利用了商业软件 FLUENT 对近自由面回转体表面非定常空化流动问题进行了模拟计算。模拟中首先建立了与试验件尺寸相同的模型，并采用结构化网格对计算域进行划分，对航行器壁面和近壁区进行网格加密处理，网格总数量为 400 万。计算中定义的边界条件如图 2 所示，由于航行器是关于中心截面对称分布，故采用对称模型计算。图中标示了计算中采用的速度入口，压力出口和无滑移壁面，中截面设置为对称面边界条件。计算中采用大涡模拟方法模拟湍流。其余的计算设置包括对于贴近壁面的流动壁面处理采用了标准壁面函数，压力隐式算法求解，利用 COUPLED 算法求解速度压力耦合等。非定常计算的时间步长为 1E-05s。

从实验和计算结果中，我们可以得到空泡形态和长度的变化趋势。图 4 为前两个周期空泡长度的发展规律，其中 Stage1-1 是空泡的生长过程，1-2 是第一次回射流的发展过程，2-1 是空泡脱落与新空泡的生长过程，2-2 是脱落空泡的溃灭和第二次回射过程。在后三个阶段中，上下表面的空泡长度存在明显差异，较长的空泡交替出现。实验和计算获得的空泡长度差异较小，计算得到的上下表面空泡长度变化规律与实验相同，计算结果总体与实验吻合良好。

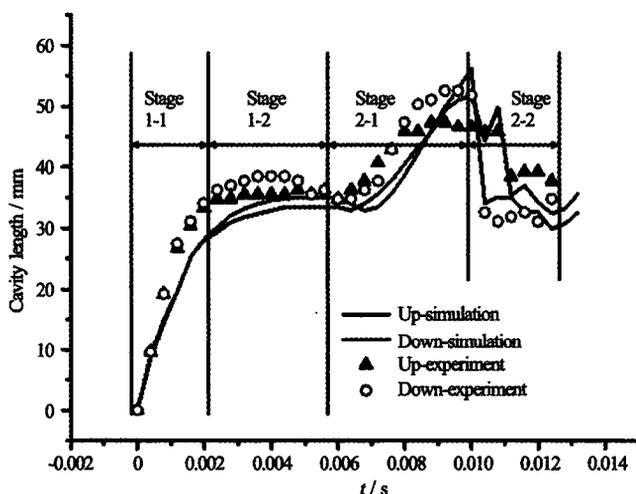


图 4 典型周期内空泡长度发展规律

4 结果分析

从图 3 显示的周期内空泡长度变化可以看出，空泡流动周期主要包括了空泡的生长，回射，脱落及溃灭四个阶段。图 5 对比了不同阶段的典型时刻实验及模拟结果中模型表面的空泡形态。初始阶段是空泡生长阶段，表现为透明空泡的稳定生长，下方空泡长度比上方略长，两者差异较小；当空泡生长至某一稳定情况下，回射流开始生成并向上游推进，上表面空泡长度比下表面明显要短，且长度关系相对稳定；回射流到达肩部之后，与主流相交切断空泡，使原有空泡发生脱落。由于上方回射流先到达，空泡脱落较早；随着脱落空泡向下游移动，旋涡强度减弱，空泡开始收缩进入溃灭阶段。

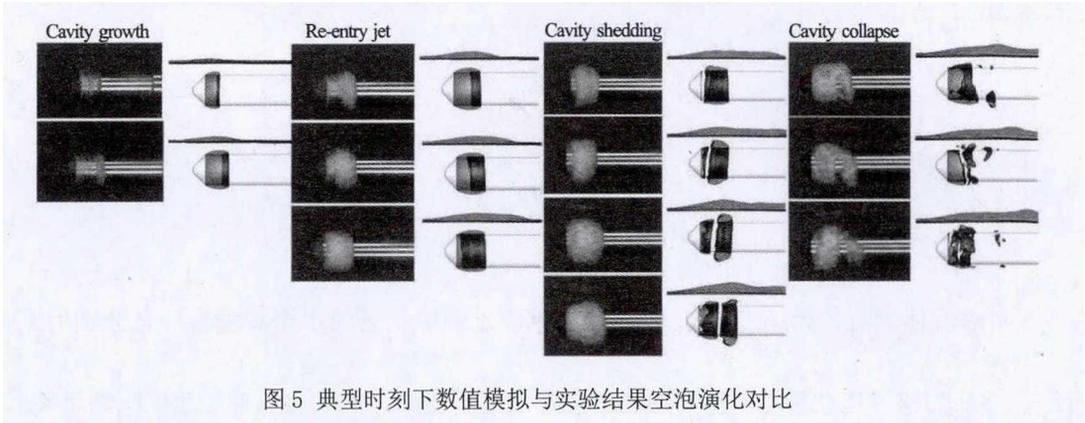


图 5 典型时刻下数值模拟与实验结果空泡演化对比

4.1 自由液面对空泡形态影响分析

针对自由表面附近空化流动，可以通过量纲分析研究影响因素如下：

$$L = f(\rho_w, \mu_w, v_\infty, D, p_\infty - p_v, H, g, t) \quad (1)$$

式中， L 为空泡长度； ρ_w 和 μ_w 分别为液态水密度和黏性系数； v_∞ 为来流速度； D 为模型直径； $p_\infty - p_v$ 为背景压力与气泡内压力差； H 为水深； g 为重力加速度； t 为演化时间。

对上式进行无量纲化如下，

$$L/D = f(\text{Re}, \sigma, H/D, \text{Fr}, \text{St}) \quad (2)$$

式中， L/D 为无量纲空泡长度； $\text{Re} = \frac{\rho_w v_\infty D}{\mu_w}$ 为雷诺数； σ 为空化数； H/D 为无量纲

深度； $\text{Fr} = \frac{v_\infty}{\sqrt{gH}}$ 为弗劳德数； $\text{St} = \frac{tv_\infty}{D}$ 为斯特劳哈尔数。

其中自由表面的影响主要体现在 H/D 和 Fr 两个无量纲参数中。 Fr 的影响主要包括

两方面，一是上下表面水深不同带来的背景压力差别，在本工况中影响较小；二是兴波影响，本章中所研究的工况由于 $Fr \gg 1$ ，相当于趋向无穷的情况，因此稳定兴波波长 $\lambda \gg D$ ，不需要考虑波的相位对空泡演化的影响，但需要分析空泡对局部波发展与兴波高度的影响机制。另一无量纲数 H/D 实际反映了上下表面的约束程度差异，需要着重进行分析。

为了更清晰地说明自由表面的影响，这里我们建立一个粗略的理论分析模型（图6）。我们把模型与自由表面之间的流动想象成宽度为 H 的回射流，初始速度为 v_∞ 。当流体流过模型的锥段后，水平和垂直速度分别变为 v_x 和 v_y ，并随后在气泡内外压差 $p_\infty - p_v$ 的作用下做类似抛物线运动。在这一过程中可忽略水平速度 v_x 的变化，则空泡厚度和长度能够表示为：

$$h = \frac{\rho H v_y^2}{2(p_\infty - p_v)} \quad (3)$$

$$L = 2v_x \left(\frac{\rho H v_y}{p_\infty - p_v} \right) \quad (4)$$

考虑流体来流初始速度为 v_∞ ，在流过锥段过程中受到的水平和垂直冲量分别为 I_x 和 I_y ，并认为该过程冲量对不同自由面高度是近似不变的，由此肩点初始速度应满足关系：

$$v_x = v_\infty - \frac{I_x}{\rho H} \quad (5)$$

$$v_y = \frac{I_y}{\rho H} \quad (6)$$

将其代入到长度和厚度表达式（3）和式（4）中便可得到：

$$L = 2 \left(v_\infty - \frac{I_x}{\rho H} \right) \left(\frac{I_y}{p_\infty - p_v} \right) \quad (7)$$

$$h = \frac{I_y^2}{2\rho H(p_\infty - p_v)} \quad (8)$$

由以上模型推导可以看出，由于自由表面条件接近于有限厚度水层，流体流过锥段过程中更容易在内外压差作用下发生转向，而航行器越接近自由表面，宽度 H 越小，肩点横向速度 v_x 越小，垂向速度 v_y 越大，同时空泡长度 L 越短，厚度 h 越厚，对于本工况中的下

表面,则可理解为 H 趋于无穷大,由此可以进一步解释发生溃灭的脱落空泡型线为左上至右下的倾斜直线形式。

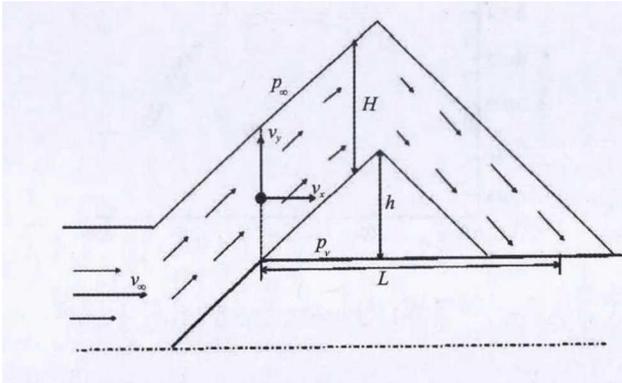


图6 自由面约束条件理论分析模型

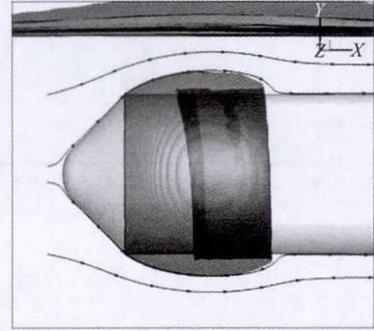


图7 实验模型流线

对于自由面约束条件理论分析的验证,我们选取了模型上方和下方各2条流线上的数据进行分析 and 对比。如图7所示,4条流线X坐标起始点均为模型肩点前半径处,Y坐标分别位于轴线上上下两侧0.1倍半径和1倍半径位置,因此4条流线的内部两条为紧贴壁面流线,按照经典的定常空泡解析理论,可以看做空泡轮廓线,外侧两条流线处于相对均匀的外流区域,对于模型上方,流线位于自由面与模型之间的位置。

图8为实验模型内侧流线Y向速度,图9为模型外侧流线Y向速度。通过对比4条流线上的径向速度分布可以看到,上方流线的Y向速度起始值比下方流线高,同时上方流线的速度下降也较下方更快,并在接近空泡末端区域具有一个较大的负值,也正由此形成了末端高压。这种速度分布规律与理论分析结果是相符的,反映出上方回射流质量更小的特点。

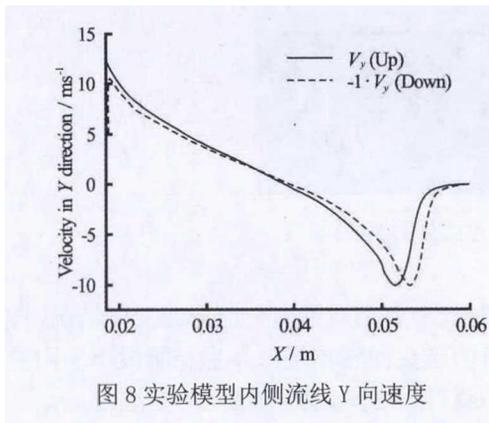


图8 实验模型内侧流线Y向速度

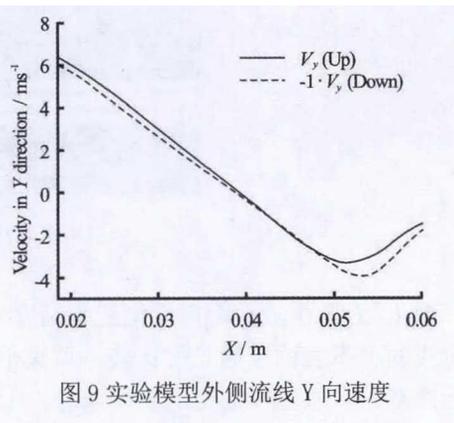


图9 实验模型外侧流线Y向速度

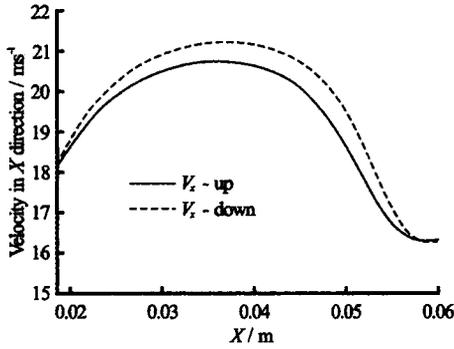


图 10 实验模型外侧 X 向速度

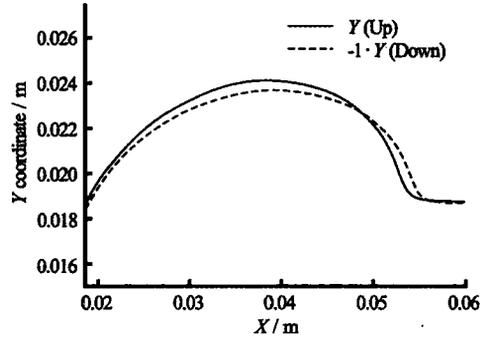


图 11 实验模型空泡型线

图 10 为实验模型外侧流线 X 向速度分布。从图 10 中可以看出下方流线 X 向速度始终高于上方，也进一步验证了上述理论分析模型中提到的下方 X 方向速度保持更大的特点。

图 11 为实验模型空泡型线图，即模型的内侧流线分布，通过比较发现该分布同样符合前述理论分析给出的结论，即上方空泡较厚而下方空泡较长的特点，这与 Fatingsen^[13] 的稳定超空泡计算结论也是一致的。

4.2 不同自由液面高度下空泡发展实验结果分析

本节进一步基于实验结果讨论不同自由液面高度对空泡发展的影响规律。实验用平头回转体模型和典型实验图像见图 12 所示，模型直径为 0.075m，长度为 0.15m，发射速度为 18 m/s，空化数 0.6，雷诺数 2.7E-6。

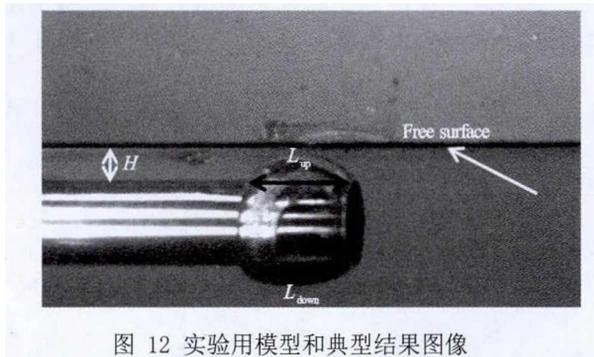


图 12 实验用模型和典型结果图像

图 13 为自由液面距离模型上端高度为 10mm 时一个典型周期内空泡形态变化情况，图对对应的上下表面空泡长度比较。可见于前述分析的锥头回转体类似，生长阶段下表面空泡长度略长。从整体的空泡发展来看，上表面能够获得长度变化更加稳定的空泡。

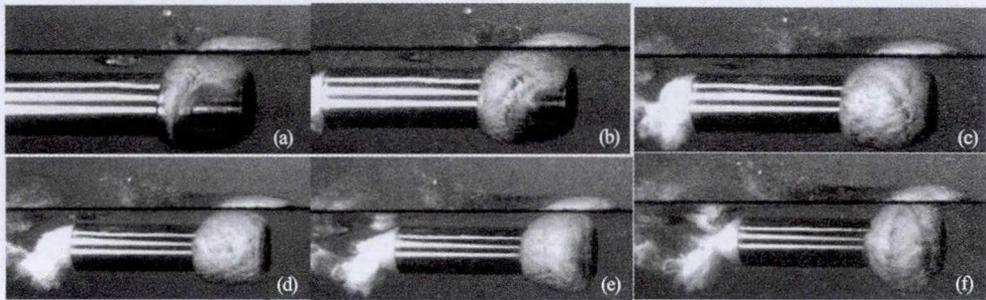


图 13 一个典型周期内空泡形态变化 ($H=10\text{mm}$)

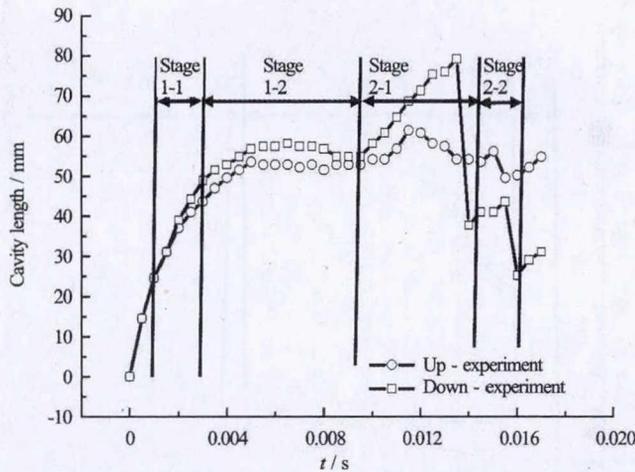


图 14 上下表面空泡长度比较 ($H=10\text{mm}$)

图 15 为自由液面距离模型上端高度为 5mm 时一个典型周期内空泡形态变化情况，图 16 为对应的上下表面空泡长度比较。从图中可以看出，随着自由液面距离模型上端高度的减小，自由液面的作用更加明显，上表面空泡长度更加稳定，即自由液面有延迟上表面空泡脱落的作用。初步分析这一现象与回射流在近自由面条件下变薄有关，由于通常认为回射流厚度与绕空泡运动水层厚度成正比，因此小深度条件下上表面的薄回射流可能不具备切断空泡引发脱落的足够栋梁。此外，这一工况内还出现了局部气体侵入的情况，有利于提升空泡内部压力，也具有一定的稳定空泡效果。

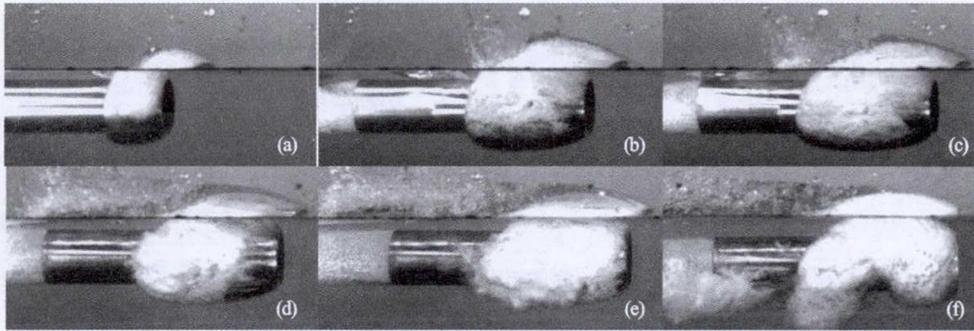


图 15 一个典型周期内空泡形态变化 ($H=5\text{mm}$)

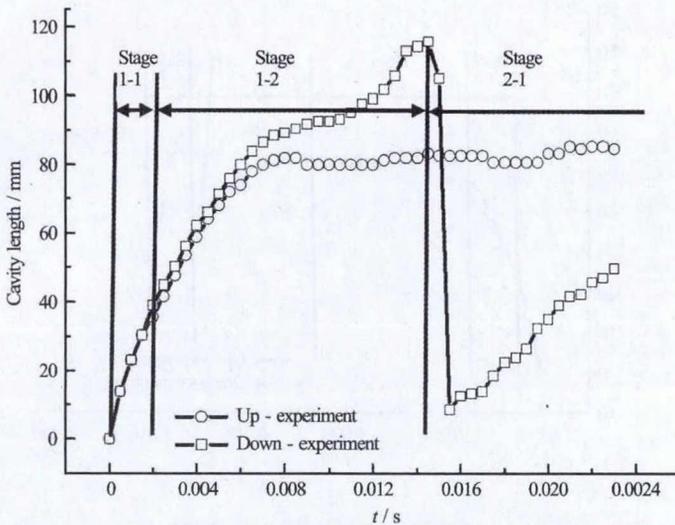


图 16 上下表面空泡长度比较 ($H=5\text{mm}$)

5 结论

本研究建立了研究近自由面空化流动问题的实验方法与数值分析方法，发现了近自由面非稳态空泡演化的新现象，结合理论分析工作研究了自由表面对空泡形态的影响机制，并探究了自由液面对空泡演化和稳定性的影响规律。

典型的自由面与空泡分离条件下实验与模拟结果表明，空泡的发展与通常的大水深条件类似，同样呈现空泡的生长、脱落、溃灭等过程。而空泡形态呈非轴对称特点，模型上

表面空泡（靠近自由面一侧）发展过程空泡较短，整体变化较稳定。

过量纲分析方法得到了自由表面附近空化流动的主要影响因素，通过对比数值计算结果中航行器的上下表面空泡的速度和型线验证了主控参数的影响规律。

基于不同水深的实验结果，发现随着水深的减小，上表面空泡更加稳定，某些特殊工况下会出现外部空气侵入并诱导出现通气空泡现象，从而在近自由面航行器上表面形成稳定的云状通气空泡。

在本研究工作的基础上，仍需要进一步开展系统的参数影响分析，深入研究自由面与空泡相互作用规律，寻找适合高速水面航行的合理参数区间。

参 考 文 献

- [1] O.M. Faltinsen, Y.A. Semenov, The effect of gravity and cavitation on a hydrofoil near the free surface, *Journal of Fluid Mechanics*, 597 (2008) 371-394.
- [2] T.E. Dawson, An experimental investigation of a fully cavitating two-dimensional flat plate hydrofoil near a free surface, *California Institute of Technology*, 11 (1962) 1651-1655.
- [3] Y. Wang, X. Wu, C. Huang, X. Wu, Unsteady characteristics of cloud cavitating flow near the free surface around an axisymmetric projectile, *International Journal of Multiphase Flow*, 85 (2016) 48-56.
- [4] J.B. Leroux, O. Coutierdelgosha, J.A. Astolfi, A joint experimental and numerical study of mechanisms associated to instability of partial cavitation on two-dimensional hydrofoil, *Physics of Fluids*, 17 (2005) 515-513.
- [5] Y.P. Wei, Y.W. Wang, X. Fang, et al. A Scaled Underwater Launch System Accomplished by Stress Wave Propagation Technique, *Chinese Physics Letters*, 28 (2011) 024601-024672.
- [6] H. Kanfoudi, H. Lamloumi, R. Zgolli, Numerical investigation for steady and unsteady cavitating flows, (2012).
- [7] Q. Wu, B. Huang, G. Wang, Numerical Simulation of Transient Flows around a 3D Pitching Hydrofoil, *Advances in Mechanical Engineering*, 7 (2014) 808034-808034.
- [8] X.C. Wu, Y.W. Wang, C.G. Huang. Effect of mesh resolution on large eddy simulation of cloud cavitating flow around a three dimensional twisted hydrofoil, *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 55 (2015) 229-240.
- [9] X. Yu, C. Huang, T. Du, et al. Study of characteristics of cloud cavity around axisymmetric projectile by large eddy simulation, *Journal of Fluids Engineering*, 136 (2014) 051303.
- [10] 王一伟, 黄晨光, 方新, 等. 水下回转航行体的云状空化回射流运动特征研究, *水动力学研究与进展*, A 辑, 2013, 28.
- [11] 胡常莉. 绕回转体空化流动特性与机理研究. 北京理工大学, 2015.
- [12] 陈鑫. 通气空泡流研究. 上海交通大学, 2006.
- [13] O.M. Faltinsen, Y.A. Semenov, The effect of gravity and cavitation on a hydrofoil near the free surface,

Journal of Fluid Mechanics, 597 (2008) 371-394.

Study on flow characteristics and stability mechanism of unsteady cavitating flow near the free surface

WANG Yi-wei, XU Chang, HUANG Jian, HUANG Chen-guang

(Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China

School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: Unstable cavitation presents an important speed barrier for underwater vehicles such as hydrofoil craft. In this paper, the authors concern about the physical problem about the cloud cavitating flow that surrounds an underwater launched projectile near the free surface at relatively high Froude number, which has not been discussed in previous research. A water tank experiment and computational fluid dynamics simulation are conducted in this paper. The results agree well with each other. The cavity evolution process in the experiment involves four stages, namely, cavity growth, re-entry jet, cavity shedding, and collapse. Numerical methods water/vapor/air three-phase large eddy simulation containing cavitation transition effect is established. Given that the distance between the upper side of the model and the free surface changes during the experiment, this paper examines the flow characteristics and stability mechanism of the unsteady cavitating flow varying with the distacen. The free surface effects on the cavitating flow around the projectile are analyzed.

Key words: Unsteady cavitating flow, Water tank experiment, Large eddy simulation, Free surface