

绕回转体浅水空泡流的实验与数值模拟研究

徐畅, 余超, 黄荐, 王一伟*, 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: 在浅水条件下, 航行体附近壁面和自由面同时影响空泡的非定常演化, 其耦合效应非常复杂。本研究针对浅水发射回转体的非定常空化流动现象进行了研究, 主要研究方法包括发射实验及 CFD 数值模拟。实验中通过高速摄像记录了空泡的非定常, 包括不同位置空泡长度和形状的发展规律。数值计算中基于商业软件 FLUENT 建立了水/气/汽三相并包含空化相变效应的大涡模拟方法, 以获得自由面-空泡-壁面相互作用结果。典型工况计算结果与实验吻合良好, 验证了数值方法的可靠性与精度。结果表明自由液面和壁面在一定距离内均能够影响回转体表面三维空泡内部回射流的位置, 改变不同垂向截面位置空泡脱落的时序, 引起空泡演化过程中流形流态的变化。其中自由液面会提高空泡的稳定性, 靠近自由液面的空泡整体形状在周期内趋于稳定。而壁面会导致空泡厚度和长度增加, 同时在距离壁面一定范围时, 航行体表面空泡会发生局部脱落。在此基础上, 模型上下表面空泡也会存在相互影响, 体现了自由面和壁面两种因素的耦合效应。

关键词: 非稳态空泡, 大涡模拟, 笛卡尔网格, 自由液面, 近壁面效应

1 引言

空化现象是物体在水下高速运动时, 由于表面局部压力降低所导致的液/气相变, 伴随着空泡的形成、发展和溃灭, 能够诱导出现空蚀、噪声、振动等现象, 因而一直是国内外研究中的前沿和重点^[1,2]。航行体表面空泡流对于航行体性能的影响是不可忽视的, 尤其是非定常空泡演化诱导的压力脉动、振动、弹道变化非常值得关注^[3,4]。空化流动实验通常可以通过空化水洞^[5] 或者是水箱发射装置^[6] 开展。此外计算流体力学方法也是近年来空化流动的主要研究手段之一, 包括 CFX、FLUENT 等商业软件都得到了广泛的应用^[7-10]。针对商业软件通用化, 难以进行二次开发的问题, 也有研究人员利用开源软件 OpenFOAM 和各

类自编程序对于空化现象进行模拟研究^[11]。

边界条件对非定常空化流动的影响很大^[12, 13]，例如自由液面^[8, 14-15]、壁面^[16]等条件的影响机制都吸引了很多研究。浅水条件下自由面和壁面两种边界条件共存且可能存在相互影响，非常值得关注。本文应用水箱发射试验及 CFD 计算方法研究了浅水发射回转体的非定常空化流动现象。文中针对自由液面和壁面两种因素的耦合效应对回转体表面空泡流动进行了分析。模拟计算结果与实验结果吻合良好，验证了模拟方法的准确性。水箱实验及模拟计算过程中观察到的空泡流动周期包括了空泡的生长，回射，脱落及溃灭四个阶段。结果显示在空泡流动过程中，模型上下表面的空泡形态存在很大的差异。靠近模型的自由液面和壁面均对模型表面空泡流产生的影响。

2 水箱实验

图 1 所示实验装置示意图中所用的回转体试验件主体为铝制。尺寸为直径 37mm，距自由液面及壁面高度均为 15mm。实验发射装置以 SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar) 作为发射源，将模型瞬间加速至约 20.5m/s 的发射速度并推入 1m × 1m × 2m 的水槽中，水温约为 20℃。在实验水槽外利用每秒 25000 帧拍摄速度的高速摄影装置记录试验件的运动轨迹，可以清晰地记录空泡发展过程，便于后续对实验现象的观察和数据处理。

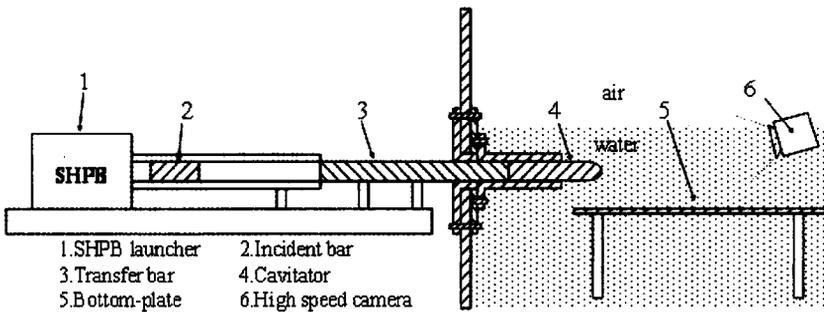


图 1 水箱发射实验示意图

3 数值模拟

利用商业软件 FLUENT 对浅水发射回转体表面空泡流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，并利用 FLUENT-Meshing 软件建立了笛卡尔网格，网格总数约为 342 万。计算中定义的边界条件如图 2 所示，图 2 中标示了计算中采用的速度入口，压力出口和无滑移壁面。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 $1E-05s$ 。

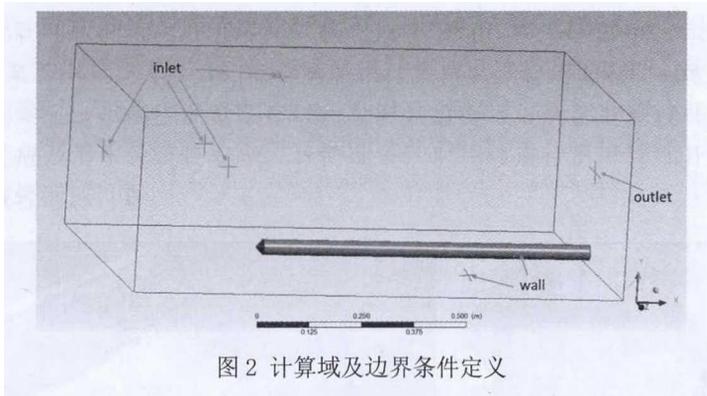


图2 计算域及边界条件定义

模拟结果中回转体上下表面的空泡长度与实验结果对比如图3所示。结果显示实验与模拟计算结果吻合良好，验证了模拟方法的准确性。

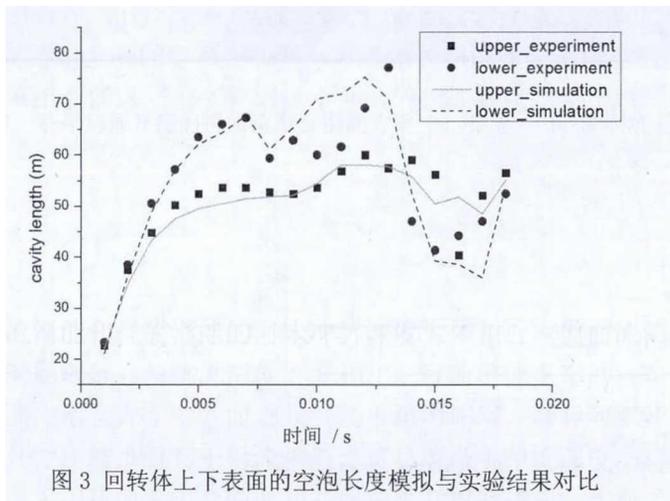


图3 回转体上下表面的空泡长度模拟与实验结果对比

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4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。初始阶段是空泡的形成和发展过程，空泡长度随时间不断增长，增长速度由快到慢，在一定时刻达到峰值；随后空泡内部回射流向模型前端发展达到模型前端，导致空泡长度急剧收缩，随后达到一个相对稳定状态；空泡的脱落发生在第三阶段，图中空泡

长度第二次的急剧减小就发生在这个阶段。在数值模拟计算中,空泡溃灭后下一个周期跟着新生空泡的生成,所以从图中可以看出模拟结果的空泡长度又开始经历了一个再次增长的过程。通过上述分析可以看出,反射流对空泡的周期性变化有着不可忽视的影响。

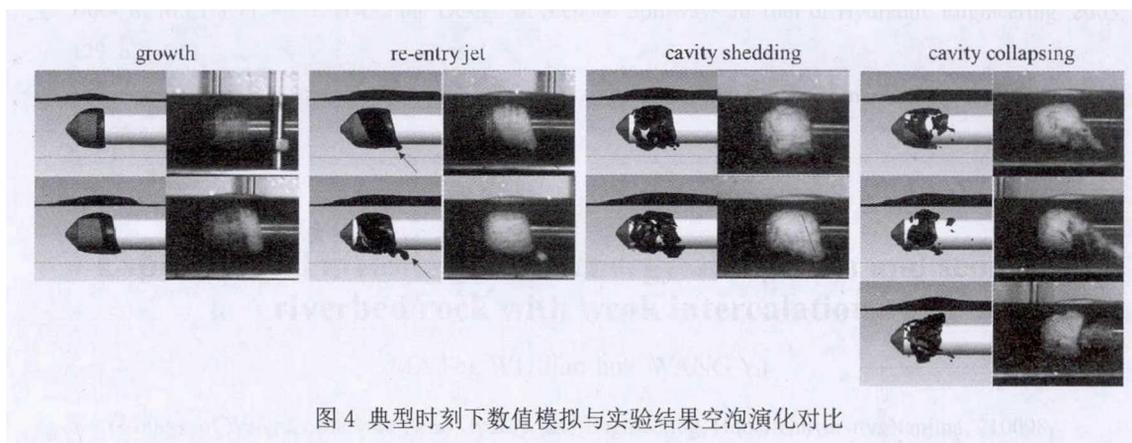


图4 典型时刻下数值模拟与实验结果空泡演化对比

从空泡演化过程中回转体上下表面空泡形态的不同中可以看出,自由液面和壁面都会对模型表面空泡流产生的较大的影响。总体上看,由于自由液面影响,模型上表面空泡在周期内演化过程中的总体形态趋于稳定,空泡长度变化很小。受到近壁面效应影响,模型下表面空泡在空泡回射阶段出现了局部脱落,空泡整体长度偏长,空泡形态在周期内变化剧烈。

4.1 自由液面影响

为分析自由液面对回转体表面空泡流的影响,图5中比较了有/无自由液面两种工况下水箱发射试验结果中模型上下表面空泡形态的对比。总的来说,对比结果显示在没有自由液面的情况下,模型上下表面空泡长度更长,意味着自由液面的影响会使空泡更短;两种工况下空泡的整体演化过程大致相似,浅水发射结果的演化周期与没有自由液面的情况相比更短,意味着自由液面的影响会使空泡演化周期更短;模型下表面空泡的局部脱落在两种工况下均有发生;值得注意的是,当回转体靠近自由液面时,模型上下表面空泡都会表现的更加稳定,说明自由液面可能在一定范围内对高速航行器有正面的影响。

4.2 壁面影响

为分析壁面对回转体表面空泡流的影响,图6中比较了有/无壁面两种工况下水箱发射试验结果中模型上下表面空泡形态的对比。总的来说,两种工况下空泡的整体演化过程大致相似,对比模型上表面空泡长度变化结果显示,壁面会导致空泡更加稳定;对比模型下表面空泡长度变化结果显示,壁面影响会导致空泡长度明显增长,周期变长;由于没有壁

面情况下模型下表面空泡没有出现局部脱落的现象，意味着局部脱落是由近壁面效应导致的。

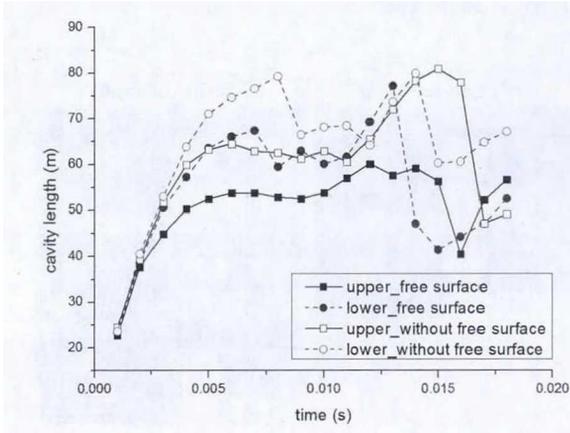


图 5 有/无自由液面两种工况下水箱发射试验结果中模型上下表面空泡长度对比

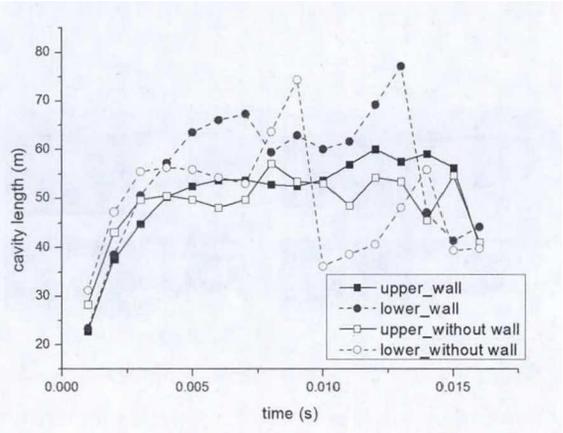


图 6 有/无壁面两种工况下水箱发射试验结果中模型上下表面空泡长度对比

4.3 空泡流内部影响

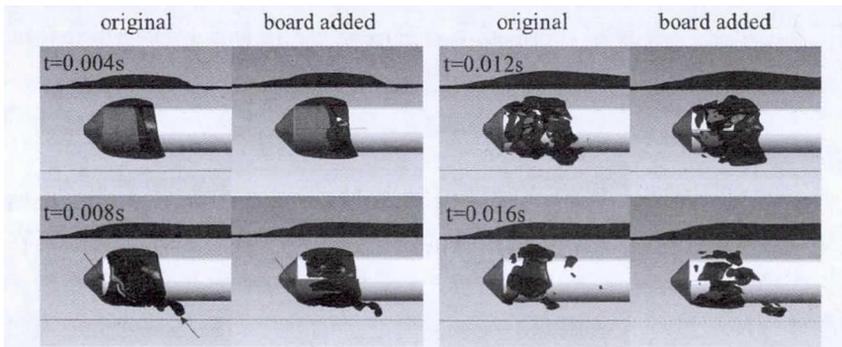


图 7 典型时刻模型表面空泡形态在模型中央添加平面后与浅水模拟工况的对比

为了分析空泡流内部，也就是模型上下表面空泡的相互影响，我们在模拟计算中在模型中央位置添加了一块没有厚度的平面。平面能够隔断空泡内部及周围的环向流动，相当于孤立了壁面和自由面的影响。图 7 显示了典型时刻模型表面空泡形态在添加平面后与浅水模拟工况的对比。值得注意的部分在图中用红色箭头标示了。从图中可以看出，最明显的区别发生在 8ms 时刻。当不存在空泡内部影响时，模型下表面空泡不会过早的脱落，也就意味着空泡周期可能会延长。

5 结论

本研究利用了水箱发射实验和 CFD 数值模拟两种方法对浅水发射回转体表面非定常空泡流动的形态特征及变化规律进行了分析, 获得了较为一致的典型空泡形态, 为后续类似的近自由液面/近壁面空化问题的研究奠定了基础。

在高速运动过程中, 回转体模型表面的空泡变化周期共分为 4 个阶段, 包括空泡的生长、回射、脱落及溃灭过程。自由液面对模型表面空泡流的影响主要包括靠近自由液面会使空泡整体长度变短, 周期变短。同时, 自由液面也会使空泡的整体形态在演化过程中保持稳定。靠近壁面会使回转体表面空泡整体长度变长, 周期变长。壁面也会对空泡稳定性有轻微的影响, 使空泡形态更稳定。近壁面效应也会导致空泡在回射阶段发生局部脱落。此外, 模型表面空泡流内部, 也就是模型上下表面空泡也存在相互影响。

在本工作的基础上, 未来仍需要进一步完善数值方法, 并将结果推广到较为广泛的参数空间中, 获得系统的参数影响规律。

参考文献

- [1] J.P. Franc, J.M. Michel, *Fundamentals of Cavitation, Fluid Mechanics & Its Applications*, 76 (2005) 1-46.
- [2] G. Wang, I. Senocak, S. Wei, T. Ikohagi, S. Cao, *Dynamics of attached turbulent cavitating flows, Progress in Aerospace Sciences*, 37 (2001) 551-581.
- [3] P. Henry, *Cavitation*, (1955).
- [4] C.E. Brennen, *Cavitation and Bubble Dynamics*, 33 (1995) 609-617.
- [5] 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.
- [6] Y.P. Wei, Y.W. Wang, X. Fang, C.G. Huang, Z.P. Duan, *A Scaled Underwater Launch System Accomplished by Stress Wave Propagation Technique, Chinese Physics Letters*, 28 (2011) 024601-024672.
- [7] H. Kanfoudi, H. Lamloumi, R. Zgolli, *Numerical investigation for steady and unsteady cavitating flows*, (2012).
- [8] 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.
- [9] Q. Wu, B. Huang, G. Wang, *Numerical Simulation of Transient Flows around a 3D Pitching Hydrofoil, Advances in Mechanical Engineering*, 7 (2014) 808034-808034.
- [10] 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.

- [11] X. Yu, C. Huang, T. Du, L. Liao, X. Wu, Z. Zheng, Y. Wang, Study of Characteristics of Cloud Cavity Around Axisymmetric Projectile by Large Eddy Simulation, *Journal of Fluids Engineering*, 136 (2014) 051303.
- [12] E. Amromin, Analysis of body supercavitation in shallow water, *Ocean Engineering*, 34 (2007) 1602-1606.
- [13] CHEN, Xin, LU, PROPERTIES OF NATURAL CAVITATION FLOWS AROUND A 2-D WEDGE IN SHALLOW WATER, *水动力学研究与进展 B 辑*, 23 (2011) 730-736.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] M. He, L. Yuan, L. Zhou, J. Yang, Z. Wang, Numerical evaluation of the side wall effect on the flow around a hydrofoil, *Engineering Computations*, 31 (2014) 501-509.

Experimental and numerical analysis of cloud cavitating flow that surrounds an axisymmetric projectile in shallow water

XU Chang, YU Chao, HUANG Jian, WANG Yi-wei *, 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: The cloud cavitating flow that surrounds an axisymmetric projectile is examined in water tank experiments and numerical simulations to find the mutual effect of the free surface and the bottom wall near the projectile. The experimental observations of cavity development are consistent with numerical results and validate the methods' accuracy. Stability and asymmetry of the cavity shape around the projectile under the effects are studied. The overall regularity shows that as the projectile closer to the wall, the cavity length and period will be longer; as the projectile closer to the free surface, the cavity length and period will be shorter and the stability will be improved.

Key words: Unsteady cavitating flow, Large eddy simulation, Cartesian cut-cell mesh method, Free surface, Near-wall effect