

DOI: 10.3969/j.issn1000-4874.2013.01.004

水下回转航行体的云状空化 回射流运动特征研究*

王一伟¹, 黄晨光¹, 方新², 杜特专¹, 于娴娴¹

(1. 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,

Email: wangyw@imech.ac.cn;

2. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: 该文针对典型的细长回转航行体的水下航行过程, 基于 SHPB (霍普金森压杆) 发射系统开展了机理性实验。相应基于单一流体/多相混合模型, 结合空化模型及修正的 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模式对该问题进行了数值模拟。并在实验与数值模拟结果的基础上, 研究了回射流诱导的云状空化不稳定性问题, 探讨了该现象中空化非稳态演化的物理机制, 分析了空泡末端回射流的产生原因以及它对空泡演化的诱导作用。进一步从压力梯度角度给出了回射流运动的动力学模型和空泡长度的预测表达式, 并通过数值结果验证了该模型和公式的有效性。

关键词: 云状空化; 回转体; 回射流模型; 逆压梯度

中图分类号: O359+.1

文献标识码: A

Characteristics of the re-entry jet in the cloud cavitating flow over a submerged axisymmetric projectile

WANG Yi-wei¹, HUANG Chen-guang¹,
FANG Xin², DU Te-zhuan¹, YU Xian-xian¹

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

2. The State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: For the cloud cavitation around slender axisymmetric projectiles, an experimental system and numerical methods were established. Experimental and numerical results were presented on a typical case. It turns out that the simulation results agree fairly well with the experimental results. An analysis of the evolution of cavitating flow is performed and the related

* **收稿日期:** 2012-05-31(2012-10-22 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金项目(11202215)

作者简介: 王一伟(1983-), 男, 河北卢龙人, 助理研究员, 博士研究生。

Received: May 31, 2012 (**Revised** October 22, 2012)

Project supported by foundation: Supported by the National Natural Science Foundation of China (11202215)

Biography: WANG Yi-wei (1983-), Male, Ph. D. Candidate.

physical mechanism of the formation and effect of re-entry jet is discussed. Furthermore, a dynamic model of re-entry jet and a prediction formula of the cavity length are presented and verified by the numerical results.

Key words: Cloud cavitation; Axisymmetric projectiles; Dynamic model of re-entry jet; Adverse pressure gradient

1 引言

航行体在水中运动时,随着速度的增大,其表面低压区的水相变为水蒸气,形成汽液混合物,即产生空化现象。空化现象可以按照空化形态分为初生空化、片状空化、云状空化和超空化等多种^[1]。其中在云状空化阶段,由于回射流等因素的影响,空化区存在准周期性的非稳态演化现象,物体表面的水动力载荷也随之产生复杂的变化,水中兵器的潜射回收等过程中大量存在此类非稳态的空化流动。因此,对典型的水下航行体非稳态空化流研究对于工业设计方面有着重要意义。

对于云状空化现象的研究始于 20 世纪 40 年代,Knapp 等^[2]对空泡末端进行了实验观测,指出了回射流可能是云状空泡分离和不稳定性的重要来源。随着水洞及水池实验和 LDV 和 PIV 等相关测量技术的发展,研究者们逐渐确认了回射流的存在,对云状空化现象的观察也更加深入。例如 Stuts 等^[3-5]开展了一系列 venturi 管的空化实验,利用双光学探头测量了空泡结构内的水蒸气体积分数和贴壁水流的速度,从而确认了回射流的存在,并采用 X 射线装置开展了相似实验并与 LDV 结果进行了对比。Callenaere 等^[6]研究了绕水翼云状空化的稳定性与回射流运动的关系,并对不同情况进行了归纳和分类。

近年来,随着 CFD 技术的发展,可通过求解 Navier-Stokes 方程来模拟高速水动力学问题及空化流场,构造了多种描述多相流动及空化相变的方法^[7]。目前的主流方法是将流场介质考虑为单一流体多组分混合物,建立关于混合物的动量方程,利用各组分的质量分数来描述混合物的密度,同时构造关于各组分的连续性方程,并引入专门的空化模型来描述相变规律。Merkle 等^[8]和 Kunz 等^[9]基于此概念提出了一系列的空化模型,其中 Singhal 等^[10]提出了基于 Rayleigh-Plesset 方程的“完全空化模型”,此模型被众多计算程序所采用。

但上述工作大多针对水翼空化进行研究,对航行体常用的回转体空化研究相对较少,所以相应的空泡非稳态演化特征和物理机制仍需进一步分析。本文针对典型的细长回转航行体的水下航行过程,基于 SHPB(霍普金森压杆)发射系统开展了机理性实验,并对该问题进行了数值模拟。通过实验与计算结果的对比分析得到了非稳态空化流的演化特征,并探讨了压力和回射流速度的动力学耦合作

用机制,在此基础上提出了压力梯度影响下的回射流运动模型以及空泡长度预示方法,并对此结果进行了验证。

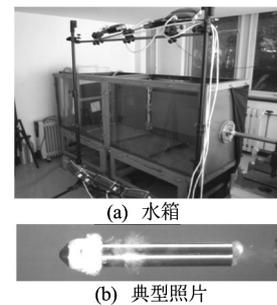


图 1 试验水箱与典型照片

Fig.1. Water tank and typical picture

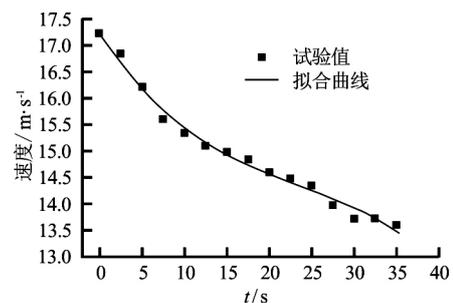


图 2 航行体速度曲线

Fig.2. Time history of launch speed of the projectile

表 1 数值方法和参数

Table 1. Numerical methods and parameters

数值方法	参数
Simulation type	Unsteady
Pressure-velocity coupling	SIMPLEC
Temporal scheme	2nd -order implicit
Time step	5×10^{-6} s
Spatial scheme	2nd-order upwind
Pressure Interpolation Scheme	Body Force Weighted
Turbulence model	Modified RNG $k-\varepsilon$

2 实验与计算方法

2.1 实验装置与条件

本文利用基于 SHPB 的水平发射系统,开展回转体云状空化的实验研究。实验装置和典型高速摄

像照片如图 1 所示, 即参考文献[11]布置实验系统。典型工况实验在水箱敞口条件下开展, 航行体直径为 37 mm, 长度为 246 mm, 头部圆锥锥角为 90°, 初速度为 17.3 m/s, 速度曲线如图 2 所示。

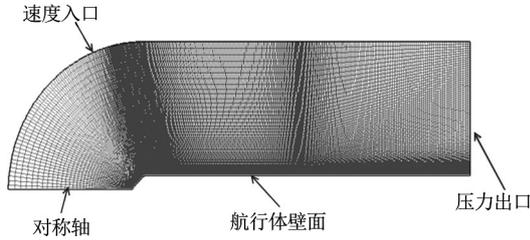


图 3 计算域与网格划分
Fig.3. Computational domain and mesh

2.2 计算模型与参数

计算采用基于单一流体多种组份的控制方程, 并引入 Singhal 空化模型描述相变, 具体过程可参见文献[10]。本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型来建立并求解关于湍动能及耗散率的输运方程^[12]。

Dular 等^[13]认为, 原始的 RNG $k-\varepsilon$ 模型本身空化区黏性耗散过强, 若直接采用该模型计算, 会陷入一种准定常状态, 无法准确模拟回射流的形成以及云状空泡分离脱落等现象。因此需引入对涡黏性系数的密度修正函数 $f(\rho)$ ^[14], 则有

$$\mu_t = f(\rho) C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1)$$

式中

$$f(\rho) = \rho_v + \frac{(\rho_m - \rho_v)^n}{(\rho_l - \rho_v)^{n-1}}, \quad n \gg 1 \quad (2)$$

式中 n 取 7 至 15 时, 计算结果非常接近, 本文取 $n=10$ 。

基于有限体积法开展计算工作, 主要的数值方法和参数如表 1 所示。

计算利用二维轴对称形式开展, 整个计算域划分为如图 3 所示的结构化网格, 壁面第一层网格厚度为直径的 1/10000, 从而能够保证壁面 y^+ 值约等于 1。

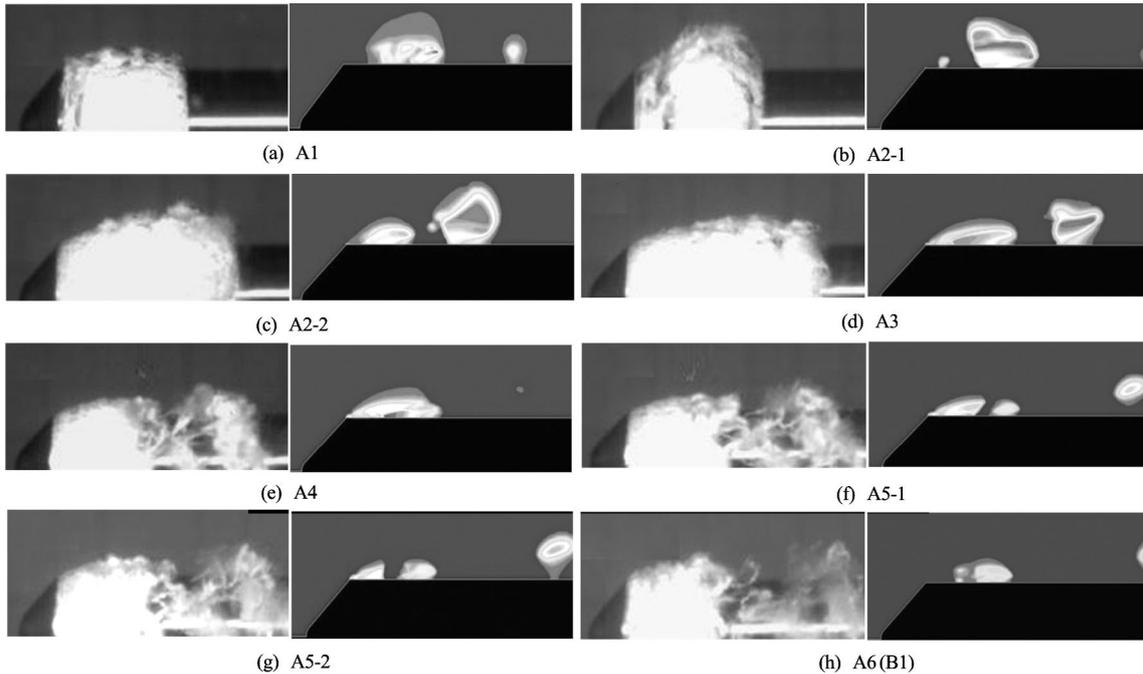


图 4 典型周期内实验与计算空泡形态的对比
Fig.4. Time evolution of cavitation patterns obtained from the experiment and simulation

3 结果分析

3.1 空泡形态分析

在一个典型周期内实验与计算得到的空泡

形态对比如图 4 所示。图中的左侧为实验的空泡形态照片, 右侧为计算得到的水蒸气体积分数, 由图中可看出, 在相同时间点, 两者的演化形式非常接近。这表明在实验和计算结果中, 空泡形态都具有明显的周期现象。

图 5 为实验与计算得到的空泡长度和厚度的对比。由图中可看出, 实验与计算得到的空泡长度和

厚度均吻合较好,这也反映了本文计算模型的合理性。

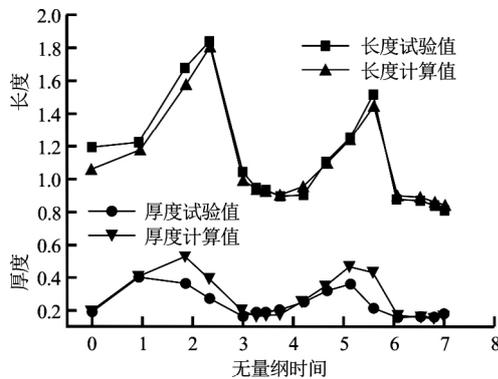


图5 空泡长度与厚度对比
Fig.5. Numerical and experimental results of cavity length and thickness

3.2 回射流运动分析

与水翼空化类似,上述空泡非定常演化也主要来自于回射流的诱导作用。一个周期内回射流的运动特征如图6所示。由图中可以看出:(1)回射流形成于空泡末端,表现为一股以液态水为主的高密度流动指向空泡的前缘,如图6(a)所示;(2)回射流在以水蒸气为主的低密度区内持续向空泡前缘运动,直到在空泡前缘和航行体肩点处与空泡外围主流流动交汇,如图6(b)和图6(c)所示;(3)回射流在主流的推动作用向下游运动并卷起原有空泡向后翻转,如图6(d)和图6(e)所示;(4)原有的空泡在后缘附近溃灭,而在肩部生长出新的空泡,在新生空泡的末端再次出现了新的回射流,如图6(f)所示。

从上述分析可知,回射流主要形成于空泡末端

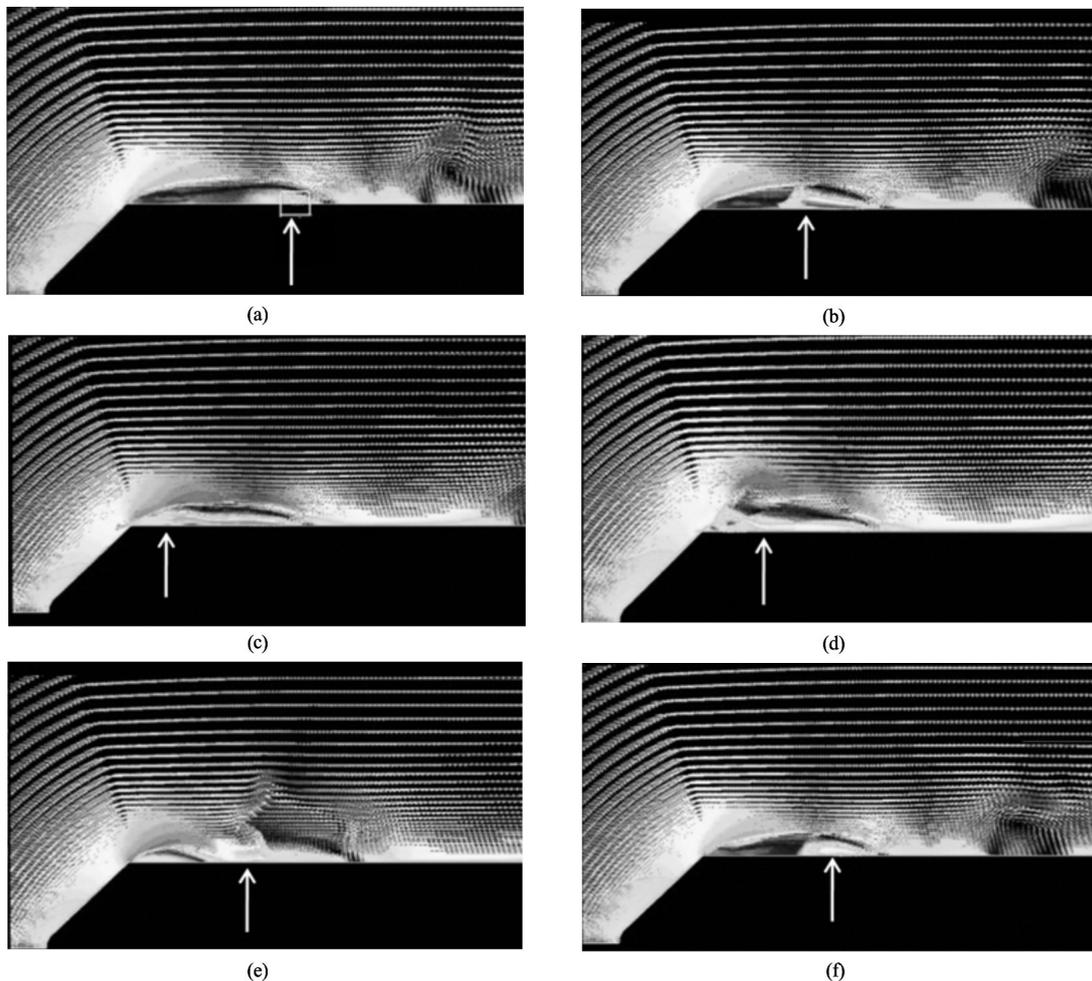


图6 回射流运动历程
Fig.6. Evolution of re-entry jet

并向上游发展。图7为空泡末端附近流场图。由图中可见,空泡末端近似驻点位置压力较高,与泡内低压共同形成很高的平行于航行体轴线的逆压梯

度,并在逆压梯度作用下,从末端高压处指向泡内产生了一层液态水流动,即前文所述的回射流。由于空泡内的主要成分是水蒸气,故对该回射流的阻

力很小, 因此该回射流能够一直向上游运动直至到达肩部。

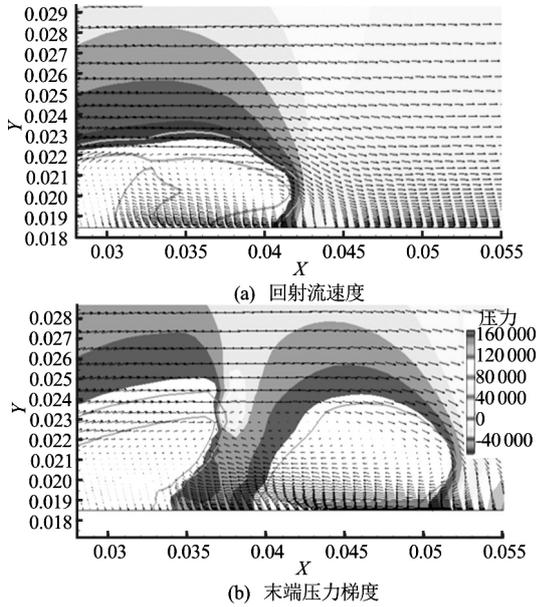


图 7 回射流速度与末端压力梯度分析
Fig.7. Velocity of re-entry jet and pressure gradient at the closure

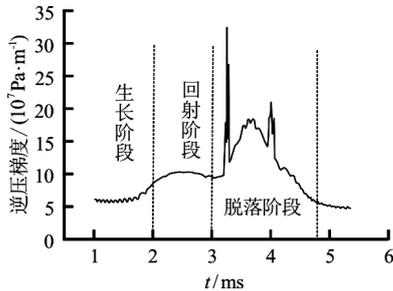


图 8 空泡末端逆压梯度演化曲线
Fig.8. Evolution of adverse pressure gradient of the cavity closure

而对于空泡末端的逆压梯度, 其在一个空泡演化周期内的演化曲线规律如图 8 所示, 图中取值为末端逆压梯度最大值。由图中可见: 在空泡生长阶段逆压梯度基本保持不变, 使得空泡可以稳定生长; 而随着逆压梯度逐渐积累升高, 回射流逐渐形成并向前运动, 在此稳定运动过程中逆压梯度仍然变化较小; 在回射流与前缘主流的相互作用下, 导致空泡脱落并在末端溃灭, 此时逆压梯度存在较大波动, 并在溃灭时明显增大, 可见空泡溃灭对于后期的空泡稳定性会有较大影响。

4 回射流运动学模型及验证

从上述分析可知, 回射流运动主要源自空泡末

端逆压梯度, 因此可进一步深入分析逆压梯度对回射流运动的影响规律。对此, 可以取固定坐标系下空泡末端的微元作为研究对象, 如图 9 所示。图中微元初始速度为 0, 在末端逆压梯度作用下逐渐向航行体头部方向加速, 当速度超过航行体速度时, 则表现为回射流动。

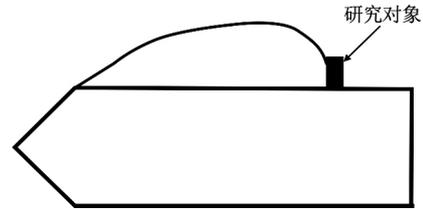


图 9 回射流运动分析模型
Fig.9. Re-entry jet model

设微元长度为 Δx , 在 Δt 时间内微元两侧压力的总冲量等于微元的动量变化, 即

$$\frac{dp}{dx} \cdot \Delta x \cdot A \cdot \Delta t = \rho \cdot A \cdot \Delta x \cdot \Delta v \quad (3)$$

由式 (3) 可进一步得到压力梯度与速度变化率时间的关系

$$\frac{dp}{dx} = \rho \frac{dv}{dt} \quad (4)$$

而在 t_0 至 t 时刻, 速度变化满足

$$\rho v_t = \rho v_{t_0} + \int_{t_0}^t \frac{dp}{dx} dt \quad (5)$$

基于式 (5) 就可通过压力梯度预测空泡末端速度的变化规律。当速度小于航行体速度即 $v_t < v_\infty$ 时, 空泡则处于生长阶段; 当速度大于航行体速度即 $v_t > v_\infty$ 时, 回射流形成, 空泡进入回射阶段。

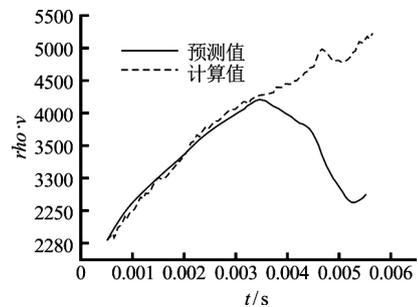


图 10 回射流运动预测表达式验证
Fig.10. Validation of predicted expression of re-entry jet's

可利用本文典型工况的计算分析结果, 对式 (5) 进行验证。同样取空泡末端一段线段的平均

动量和线段中的逆压梯度进行积分, 计算结果中动量变化与利用式(5)预测得到的动量变化如图 10 所示。由图中可见, 式(5)预测得到的动量变化曲线和计算结果的动量变化曲线在图中箭头所示时间点之前吻合良好, 而该时间点恰好对应回射流回到肩点的时刻, 此时在空泡肩部同样形成高压, 空泡演化不再仅仅由逆压梯度所主导。因此, 该对比结果验证了上述利用逆压梯度预测回射流速度方法的有效性。

可将式(5)进行再次时间积分得到空泡的长度变化公式

$$L_t = L_{t_0} + \int_{t_0}^t \left[v_{\infty} - v_{t_0} - \frac{1}{\rho} \int_{t_0}^t \alpha \left(\frac{dp}{dx} \right)_{\max} dt \right] dt \quad (6)$$

考虑到实际应用中平均逆压梯度难以测量, 故上式中采用的是末端最大压力梯度, 因此在压力梯度之前加入了参数 α 用以描述最大压力梯度与平均压力梯度的差别。图 11 为利用数值模拟对预测结果进行验证, 图中 L_1 和 L_2 分别为空泡贴近壁面处的长度和外围最长部分的长度。由图可见, 当 $\alpha = 0.14$ 时, 预测结果基本能够反映空泡长度的变化, 并给出了近似的长度预测值。

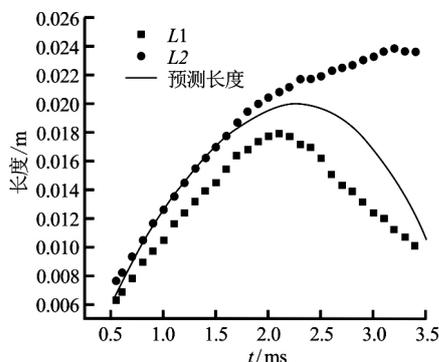


图 11 空泡长度预测表达式验证

Fig.11. Validation of predicted expression of cavity length

5 结论

本文针对水下回转航行体云状空化问题, 开展了实验和计算研究和相关分析, 得出以下结论:

(1) 在实验和计算结果中, 空泡形态均表现为准周期性的非稳态变化, 且实验与计算的空泡形态结果吻合良好。

(2) 通过泡内压力与回射流速度耦合分析表明, 空泡非定常演化主要由回射流诱导形成, 而空泡末端逆压梯度是产生回射流的主要原因。

(3) 本文基于分析结果提出了回射流动力学模

型, 给出了逆压梯度作用下回射流速度和空泡长度的变化预测关系式, 并通过数值模拟结果验证了预测公式的有效性。

未来可基于本文结果和模型开展进一步工作, 细化不同工况下的模型参数, 为工程实际提供更直接的参考。

参 考 文 献:

- [1] BRENNEN C E. Cavitation and bubble dynamics[M]. New York, USA: Oxford University Press, 1995.
- [2] KNAPP R T, HOLLANDER A. Laboratory investigations of the mechanism of cavitation[J]. Trans. ASME, 1948, 70(5): 419-435.
- [3] STUTZ B, LEGOUPIL S. X-ray measurements within unsteady cavitation[J]. Experiments in Fluids, 2003, 35(2): 130-138.
- [4] STUTZ B, REBOUD J L. Experiments on unsteady cavitation[J]. Experiments in Fluids, 1997, 22(3): 191-198.
- [5] STUTZ B, REBOUD J L. Measurements within unsteady cavitation[J]. Experiments in Fluids, 2000, 29(6): 545-552.
- [6] CALLENAERE M, FRANC J P, MICHEL J M, et al. The cavitation instability induced by the development of a re-entrant jet[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 444: 223-256.
- [7] COUTIER-DELGOSHA O, STUTZ B, VABRE A, et al. Analysis of cavitating flow structure by experimental and numerical investigations[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 578: 171-222.
- [8] MERKLE C L, FENG J, BUELOW P E O. Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation[C]. Proc. 3rd International Symposium on Cavitation, Grenoble, France, 2001.
- [9] KUNZ R F, BOGER D A, STINEBRING D R. A preconditioned Navier-Stokes method for two-phase flows with application to cavitation[J]. Computers and Fluids, 1998, 29(8): 849-875.
- [10] SINGHAL A K, ATHAVALE M M, LI H, et al. Mathematical basis and validation of the full cavitation model[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 617-624.
- [11] WEI Yan-peng, WANG Yi-wei, FANG Xin, et al. A scaled underwater launch system accomplished by stress wave propagation technique[J]. Chinese Physics Letters, 2001, 28: 024601.

- [12] WILCOX D C. Turbulence modeling for CFD[M]. 2nd Edition, La Canada, California, USA: DCW Industries, Inc, 2001.
- [13] DULAR M, BACHERT R, STOFFEL B, et al. Experimental evaluation of numerical simulation of cavitating flow around hydrofoil[J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2005, 24(4): 522-538.
- [14] COUTIER-DELGOSHA O, FORTES-PATELLA R, REBOUD J L. Evaluation of the turbulence model influence on the numerical simulations of unsteady cavitation[J]. Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(1): 38-45.