

水下回转航行体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 于嫻嫻¹

¹(中国科学院力学研究所水动力学与海洋工程重点实验室, 北京, 100190)

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)

Email: wangyw@imech.ac.cn

摘要: 本研究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。相应的基于单一流体/多相混合模型, 结合空化模型及修正的 RNG $k-\epsilon$ 湍流模式对该问题进行了数值模拟。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, 并通过数值结果进行了验证。

关键词: 云状空化; 回转体; 回射流模型; 逆压梯度

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都大量存在非稳态的空化流动。因此, 典型的水下航行体非稳态空化流研究对于工业设计有重要意义。

对于云状空化现象的研究始于 20 世纪 40 年代 Knapp 等^[2]对空泡末端的实验观测, 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、水池实验和 LDV 和 PIV 等相关测量技术的发展, 人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 和 Reboud^[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, 也采用 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 技术的进步, 人们通过求解 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]。其中目前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^[8], Kunz 等^[9]基于这个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”,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较少,相应的空泡非稳态演化特征和物理机制仍需进一步分析。本研究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。相应的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、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,利用前述结果进行了验证。

2 实验与计算方法

2.1 实验装置与条件

利用基于 SHPB 的水平发射系统,开展了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,详细的实验系统介绍见文献[11]。典型工况实验在水箱敞口条件下开展,航行体直径 37mm,长度 246mm,头部圆锥锥角为 90°,初速度为 17.3m/s,速度曲线如图 2。

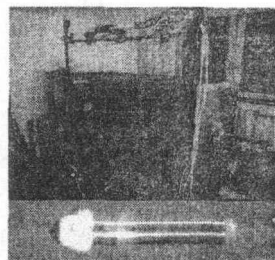


图 1 试验水箱与典型照片

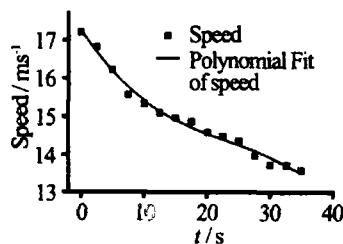


图 2 航行体速度曲线

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,详见文献 10。本研究采用 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^[13]认为,原始 RNG $k-\varepsilon$ 模型本身空化区黏性耗散过强,直接采用该模型时计算结果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。因此引入对涡黏性系数的密度修正函数 $f(\rho)$ ^[14]:

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

其中

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

当 n 取 7 至 15 时计算结果非常接近，这里取 $n=10$ 。

计算基于有限体积法开展，主要的数值方法和参数如表 1。

表 1 数值方法和参数

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- ϵ

计算利用二维轴对称形式开展，整个计算域划分为如图 3 形式的结构化网格，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。

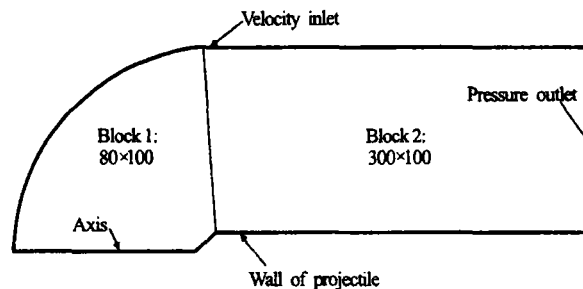


图 3 计算域与网格划分

3 结果分析

3.1 空泡形态分析

实验和计算结果中空泡形态都显示出明显的周期现象。一个典型周期内实验与计算得到的空泡形态对比如图 4。系列的左侧为空泡形态照片，右侧为计算得到的水蒸气体积分数。相同时间点，两者演化形式非常接近。

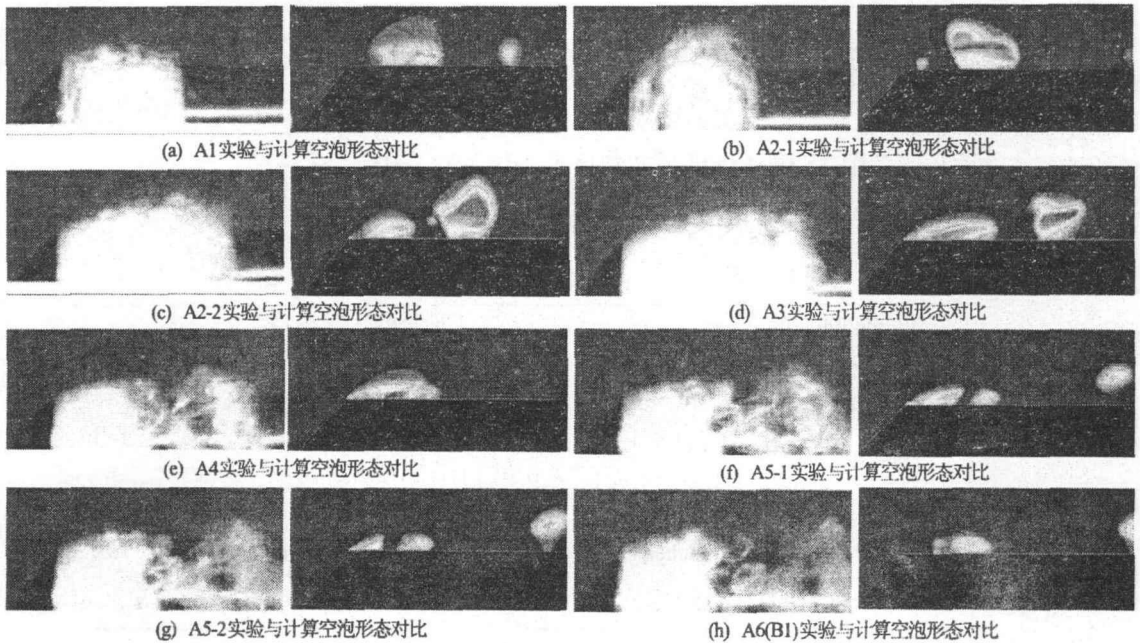


图 4 典型周期实验与计算空泡形态对比

对比实验与计算得到的空泡长度和厚度如图 5，二者同样吻合较好，也反映了计算模型的合理性。

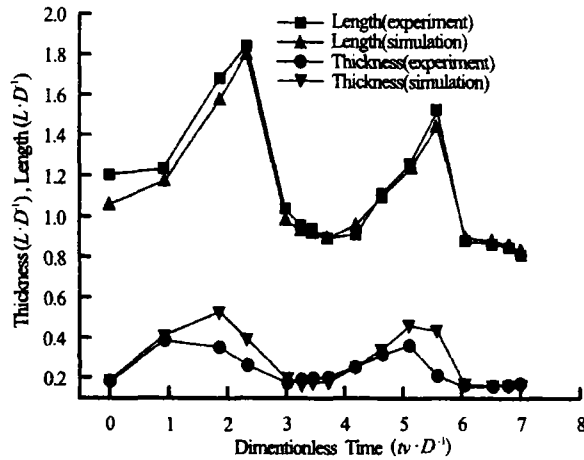


图 5 空泡长度与厚度对比

3.2 回射流运动分析

与水翼空化类似，前述空泡非定常演化也主要来自于回射流的诱导作用，而回射流的形成主要来源于空泡末端压力梯度。对此，取空泡靠近壁面处平行于轴线的一条线段上速度和压力分布如图 6 和图 7 所示，线段距对称轴为 $0.51D$ ， D 为航行体直径。图中 c_p 和 \tilde{v} 分别为无

量纲的压力系数和轴向速度，定义为 $c_p = \frac{P}{0.5\rho v_0^2}$ ， $\tilde{v} = \frac{v_x}{v_0}$ ，其中 v_0 为初速度 1.73m/s。

整个周期分为如下阶段：

- (1) 空泡在肩点发生溃灭形成压力峰值，上一周期形成的回射流与主流共同形成主空泡区的涡流（如图 6 上）；
- (2) 新生空泡在肩部产生，相应的末端压力略有升高。遗留空泡在向后主导流动与上一周期回射流的共同作用下，处在漩涡区中，变长、变厚并旋转脱落（如图 6 中）；
- (3) 脱落空泡开始发生溃灭，溃灭产生的高压与新生空泡核心区低压形成很强的逆压梯度，新的回射流动形成（如图 6 下）；
- (4) 脱落空泡继续发生溃灭，同时在该区域形成非常高压，大大增加逆压梯度使回射流显著加速（如图 7 上）；
- (5) 回射流紧贴壁面向肩点方向反向运动，在空泡中段形成局部的压力扰动，将原空泡分割成两部分（如图 7 中）；
- (6) 随着回射流的持续运动，空泡的上游部分迅速缩小，最终在肩点发生溃灭。到此时回射流诱导了一个完整的空泡演化周期，空泡和流场状态又回到状态 1（如图 7 下）。

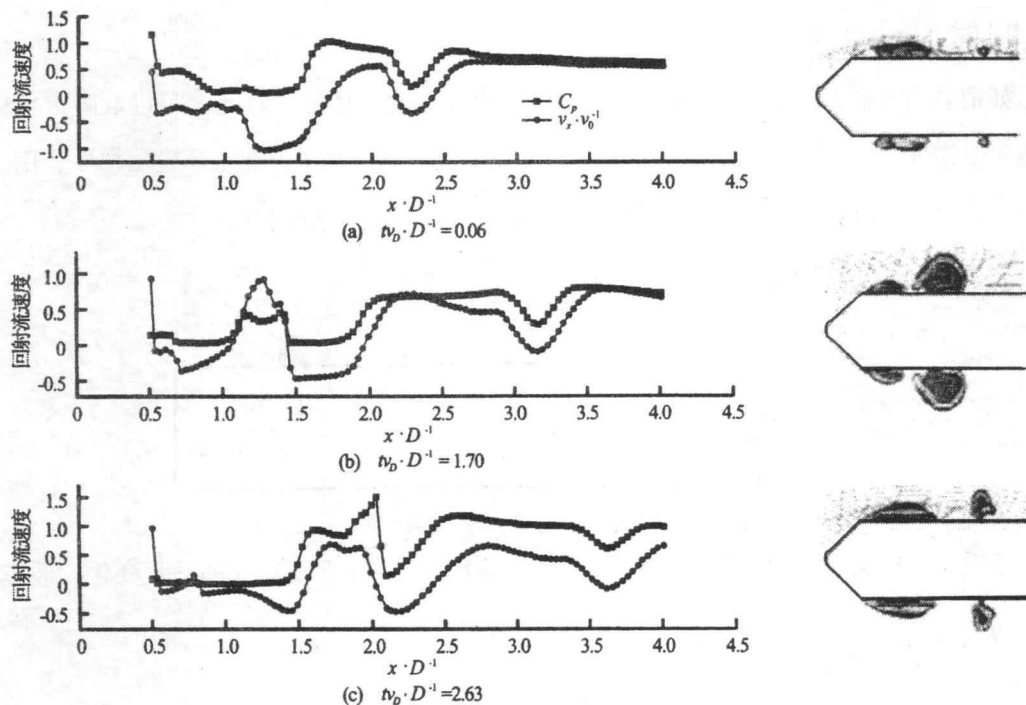


图 6 回射流速度与泡内压力耦合分析-1

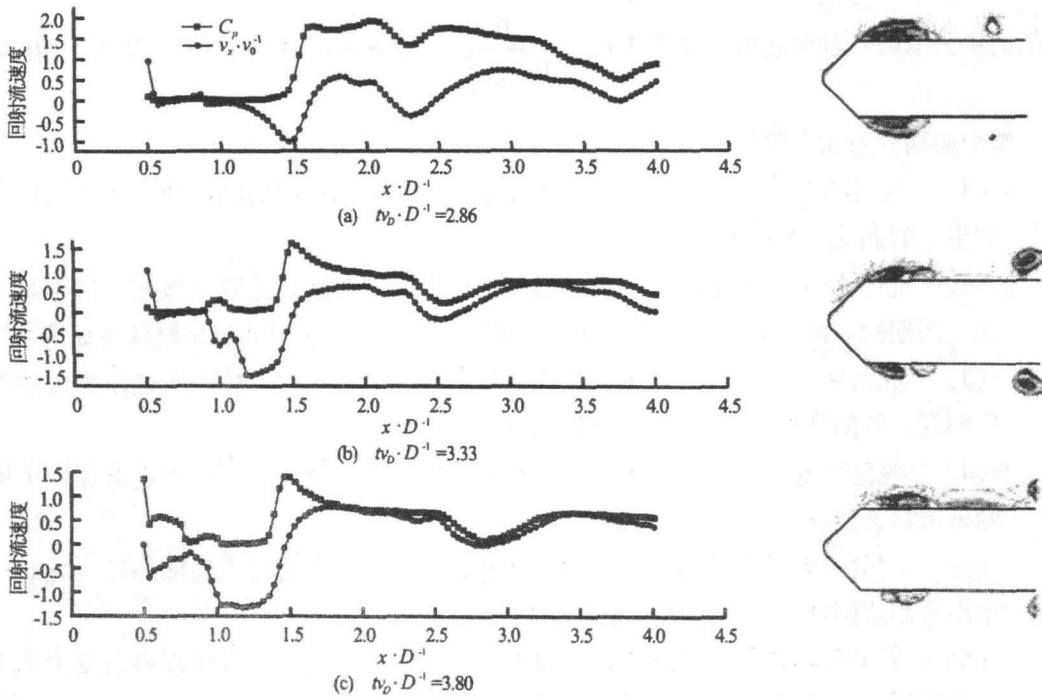


图 7 反射流速度与泡内压力耦合分析-2

4 反射流运动学模型及验证

如前述所分析的，反射流运动主要源自空泡末端逆压梯度。对此，可以取固定坐标系下空泡末端微元作为研究对象（如图 8 所示）。微元初始速度为 0，在末端逆压梯度作用下逐渐航行体头部方向加速，当速度超过航行体速度时，则表现为反射流动。

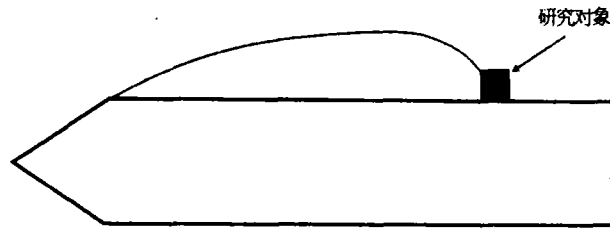


图 8 反射流运动分析模型

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

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

可进一步得到压力梯度与速度变化率时间的关系

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

在 t_0 至 t 时刻, 速度变化满足关系

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

基于上式则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。

利用本研究典型工况的计算分析结果, 可对公式 (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逆压梯度积分, 计算结果中动量变化与利用公式 (5) 预测得到的动量变化如图 9 所示。可见两条曲线在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, 该对比结果也反映了前述利用逆压梯度预测回射流速度方法的有效性。

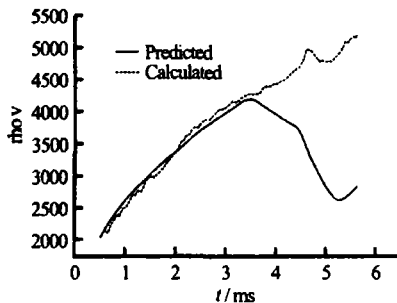


图 9 回射流运动预测表达式验证

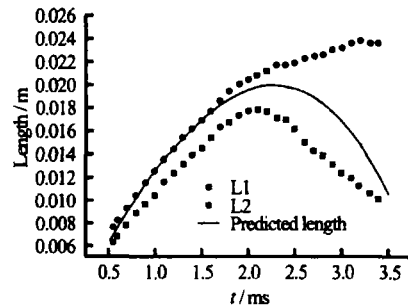


图 10 空泡长度预测表达式验证

进一步, 可将公式 (5) 进行再次时间积分得到空泡的长度变化公式如下,

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

考虑到实际应用中平均逆压梯度难以测量, 本公式中采用了末端最大压力梯度, 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。同样利用数值模拟结果进行验证如图 10, 图中 L1 和 L2 分别为空泡贴近壁面处的长度和外围最长部分的长度, 可见当 $\alpha = 0.14$ 时, 预测结果基本能够反映空泡长度的变化, 并给出近似的长度预测值。

5 结论

本研究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,取得了如下结论:

- (1) 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,两者空泡形态结果吻合良好;
- (2) 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产生回射流的主要原因;
- (3) 文章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,通过数值模拟结果验证了公式的有效性。

基于本研究结果和模型仍可进一步开展工作,细化不同工况下模型参数,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, USA:Oxford University Press,1995.
- 2 Knapp RT, Hollander A. Laboratory Investigations of the Mechanism of Cavitation. Trans. ASME, 1948,70(5): 419-435.
- 3 Stutz B, Legoupil S. X-Ray Measurements within Unsteady Cavitation. Experiments in Fluids, 2003, 35(2):130-138.
- 4 Stutz B, Reboud J. Experiments on Unsteady Cavitation. Experiments in Fluids, 1997, 22(3): 191-198.
- 5 Stutz B, Reboud J. Measurements within Unsteady Cavitation. 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. 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. Journal of Fluid Mechanics, 2007,578:171-222.
- 8 Merkle C L, Feng J, Buelow PEO. Computational Modeling of the Dynamics of Sheet Cavitation. 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. 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. Journal of Fluids Engineering, 2002,124(3):617-624.
- 11 Wei Y P, Wang Y W, Fang X, et al. A Scaled Underwater Launch System Accomplished by Stress Wave Propagation Technique. Chinese Physics Letters, 2011, 28: 024601.

- 12 Wilcox D C. Turbulence Modeling for Cfd , 2nd Edition. USA:DCW Industries, Inc, 1998.
- 13 Dular M, Bachert R, Stoffel B, et al. Experimental Evaluation of Numerical Simulation of Cavitating Flow around Hydrofoil. 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. Journal of Fluids Engineering. 2003,125(1):38-45.

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 Hydrodynamics and Ocean Engineering, 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)

Email: wangyw@imech.ac.cn

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 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.