

不同攻角条件下绕平头回转体初生空化的形成及发展特性研究

杨龙, 胡常莉*, 罗倩

(南京理工大学能源与动力工程学院, 南京 210094, Email:18751966052@163.com)

摘要: 为了探讨不同来流条件对附着型空化初生特性的影响规律, 本研究采用大涡模拟(LES)方法开展了不同攻角条件下, 绕平头回转体初生空化形态及发展特性。研究表明: 不同攻角条件下, 初生空穴均发生在绕平头回转体的肩部分离涡区域, 其形态呈不规则团状游离态且存在明显的周向运动; 攻角对绕平头回转体初生空穴的分布产生明显的影响, 随着攻角的增大, 初生空穴的分布区域逐渐缩小并移向回转体背流面, 而回转体的迎流面及两侧区域的初生空穴形成几率减小。另外, 随着攻角的增大, 周向绕流回转体的运动加强, 改变了绕回转体的漩涡结构, 促使初生空穴的周向运动由随机性向规律性发展。

关键词: 初生空化; 平头回转体; 攻角; 周向运动

1 引言

水下航行体在水中高速运动时, 航行体附近会产生局部低压区, 当压力降低到水的饱和蒸汽压, 则会产生空穴, 该现象称为空化。空化现象直接影响航行体在水下运动的稳定性和受力特性^[1]。空化一直是水动力学研究的重点、热点课题之一^[2], 而初生空化的研究涉及到空化初生机理、生成条件以及抑制空化等, 一直是空化现象研究的关键问题^[3]。近年来, 国内外众多学者对初生空化进行了研究, Tsuru^[4]通过实验研究了二维缩放喷管内部片空化的初生特性, 发现气核的大小及密度对片空化的初生特性具有重要的影响。Liu^[5]通过实验研究了相同头体在不同气核密度水洞中的初生空化特性, 发现气核密度越大, 越容易产生初生空化。Arndt^[6]认为旋涡空化产生在剪切层内漩涡的涡心低压区域内。刘桦等^[7]通过水洞实验对五个典型头体的初生空化进行研究, 建立了平头系列回转体在不同攻角条件下初生空化数的工程计算公式。Hu^[8]通过实验的方法研究了绕不同头型回转体的初生空化

*基金项目: 国家青年科学基金 (No. 51606097)

特性, 研究发现绕平头回转体和锥头回转体初生空化均发生在回转体肩部分离涡区域内。数值研究方面, 黄彪^[9]采用基于空间尺度修正的滤波器模型(FBM)对绕回转体初生空化进行研究, 发现该模型计算得到的初生空穴的形态回转体表面的压力系数均与实验一致。薛梅新^[10]采用大涡模拟方法(LES)对高压喷嘴内的空化初生进行数值计算, 计算得到的时均空泡形态及位置与实验结果吻合较好。季斌^[2]详细地介绍了 Schnerr^[11], singhal^[12], Zwart^[13]等基于 R-P 方程的空化模型, 通过基于质量输运方程构建不同的空化模型的源项, 这类模型在目前空化流动的数值模拟中应用较为广泛。

基于前人研究, 本文采用大涡模拟(LES)方法研究了绕平头回转体在不同来流攻角条件下的空化初生特性, 对比分析了不同攻角条件下初生空化的形态、分布及流场结构的差异。

2 数值方法

采用均质两相流模型, 假设气相和液相的速度和压力一致。控制方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

式中 u_i 表示流体速度在 i 方向的分量(i 与 j 表示坐标方向), p 为混合流体的压力。其中流体黏度 μ 和混合流体密度 ρ 定义如下:

$$\mu = \alpha_v \mu_v + (1 - \alpha_v) \mu_l \quad (3)$$

$$\rho = \alpha_v \rho_v + (1 - \alpha_v) \rho_l \quad (4)$$

式中, α_v 为液相体积分数, μ_v 与 μ_l 分别为流体的动力黏度和湍流黏度, ρ_v 与 ρ_l 分别为混合流体气相密度与液相密度。

湍流模型采用大涡模拟(LES), 文献[14]通过大涡模拟(LES)方法对绕方柱体的初生空化流动进行数值模拟, 发现采用 LES 方法模拟得到的结果与实验数据十分吻合, LES 湍流模型将湍流流场中的大尺寸漩涡和小尺寸漩涡分开处理, 其中大尺寸漩涡通过 N-S 方程直接求解, 小尺寸漩涡通过亚格子模型建立与大尺寸漩涡的关系进行模拟。空化模型采用 Zwart^[13]空化模型, 空化模型是在假设气液两相混合的空化流为均质流的基础上建立的, 空化过程通过气液两相间的质量输运方程模型完成模拟。

数值计算采用与实验^[3]几何尺寸相同的模型, 计算采用的空化数和雷诺数均与实验一致。计算区域及边界条件设置如图 1 所示, 边界条件设置为速度入口, 压力出口, 回转体表面采用绝热无滑移固壁条件, 流动区域的上下及左右边界均设置为自由滑移壁面条件。

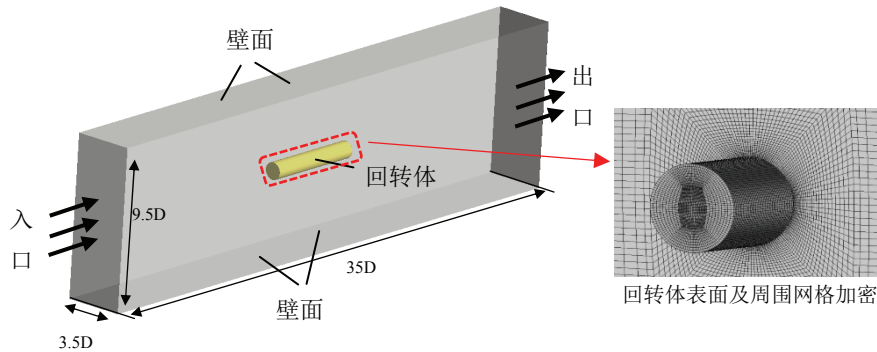


图1 计算域、边界条件设置及近壁面网格加密示意图

3 结果讨论与分析

图 2 分别展示了不同攻角条件下绕平头回转体初生空化的形态及其随时间的演变过程。其中，图 2(a)和图 2(b)分别是 0° 攻角条件下，实验观测^[3]与数值计算得到的空穴形态随时间的发展过程。与实验结果对比，发现 LES 方法可以较好地模拟绕平头回转体初生空穴随时间的演变过程， t_0 时刻初生空穴呈团状游离态分布在回转体肩部区域；在 t_0 至 $t_0+0.36T$ 时间段内，空穴融合长大；在 $t_0+0.36T$ 至 $t_0+0.54T$ 时间段内，初生空穴逐渐断裂收缩； $t_0+0.54T$ 至 $t_0+0.9T$ 时间段，空穴逐渐溃灭。初生空穴在随时间演变的同时，不仅会随着主流向下游运动，而且会绕回转体做周向运动。图 2(c)和图 2(d)分别是数值计算得到的 5° 攻角和 10° 攻角条件下，绕平头回转体初生空穴形态随时间的发展过程。从图中可以看出， 5° 攻角和 10° 攻角条件下空穴的形态及其随时间的演变过程与 0° 攻角条件下基本相似，均呈团状游离态分布在回转体肩部，随着时间的发展，均经历了空穴长大—收缩—溃灭的过程，同时可以观察到空穴在演变的过程中存在明显的周向运动。

图 3 为 0.03s 时间内，不同攻角条件下绕平头回转体初生空穴的形成位置及溃灭位置在周向上的分布统计，其中同一组空穴的标志分为空心标志和实心标志，空心标志代表该组空穴的形成位置，实心标志代表该组空穴的溃灭位置。从图中可以看出， 0° 攻角时，初生空穴较均匀地分布在回转体周围，空穴从形成到溃灭的过程中绕回转体做周向运动，且周向运动的方向和位移大小具有随机性；随着攻角增大到 5° 时，初生空穴主要发生在回转体的两侧及背流区域，空穴从形成到溃灭存在向背流面作周向运动的趋势；当攻角增大到 10° 时，初生空穴的分布范围进一步向背流面收缩，在回转体两侧区域及迎流区域产生空穴的几率减小，空穴从形成到溃灭存在明显的向回转体背流面发展的周向运动趋势，如图中箭头所示。

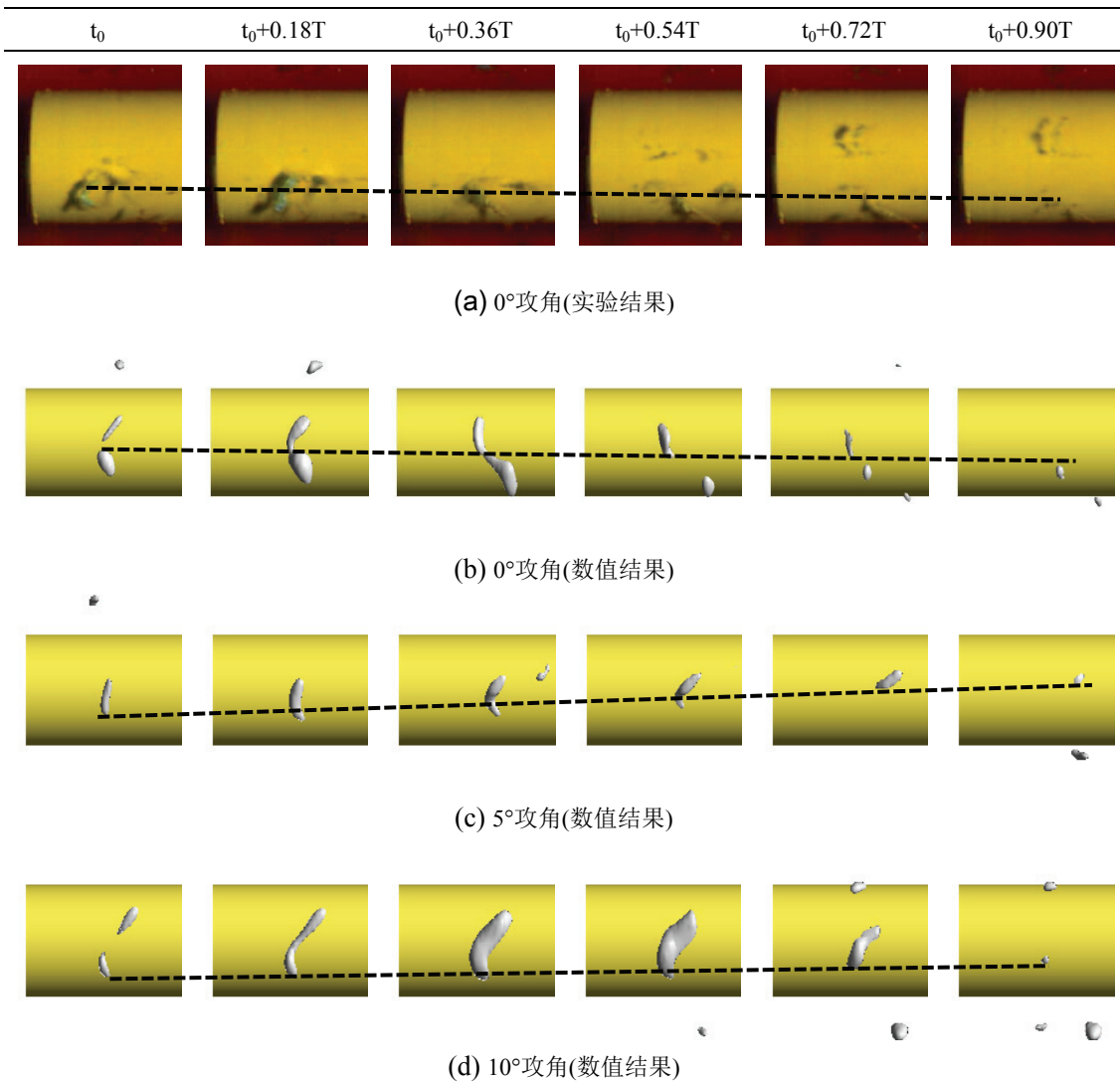


图2 不同攻角条件下绕平头回转体初生空化形态随时间的演变过程

图4分别给出了0°攻角、5°攻角及10°攻角条件下，平头回转体表面、纵截面及空化区域横截面上的时均压力云图。从图中可以看出，不同攻角条件下，在回转体的肩部区域均存在低压区域，而空化较易发生在该区域。随着攻角的增大，回转体肩部区域上的压力分布出现明显的不对称性，迎流面的低压区域逐渐减小且向回转体头部及壁面靠近，背流面

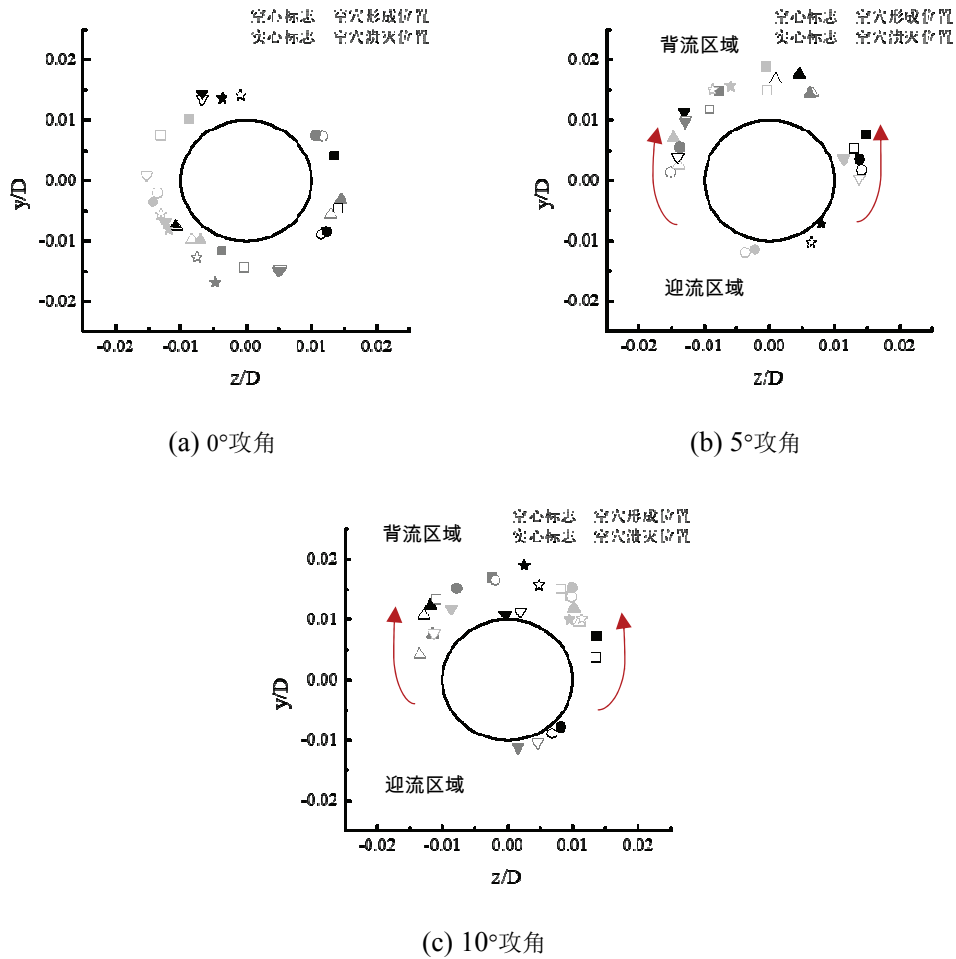


图3 不同攻角条件下绕平头回转体初生空穴在周向上的位置分布统计

的低压区域逐渐增大且远离回转体壁面。另外，从空化区域横截面上的时均压力云图可以看出， 0° 攻角时，低压区域较均匀地绕回转体周向分布；随着攻角的增大，低压区域逐渐向背流区域发生偏离；当攻角增大到 10° 时，低压区域主要集中分布在回转体的背流区域及靠近背流面的两侧区域。低压区域的变化，促使空化区域随着攻角的增大逐渐向回转体背流面移动，回转体迎流面及两侧区域产生空化的几率逐渐减小。

图5分别展示了 0° 攻角、 5° 攻角及 10° 攻角条件下，平头回转体在空化区域横截面上的时均漩涡结构。从图5(a)中可以看出， 0° 攻角时，存在较多的漩涡结构随机地分布在回转体周围，其旋转方向不一；随着攻角增大到 5° 时，由于来流攻角的影响，产生了明显的周向绕流运动，此时受绕流运动影响，漩涡结构明显减少，回转体两侧漩涡结构的旋转方向也产生变化；当攻角增大到 10° 时，周向绕流运动加强，此时，漩涡结构进一步减少，只存在两个尺度较大且旋转方向相反的漩涡结构分别分布在回转体靠近背流面的两侧区

域。结合空穴周向运动的变化发现，随着攻角的增大，由于周向绕流运动的影响，使漩涡结构由随机的旋转方向变为有规律的旋转，促使空穴的周向运动从随机性向规律性发展。

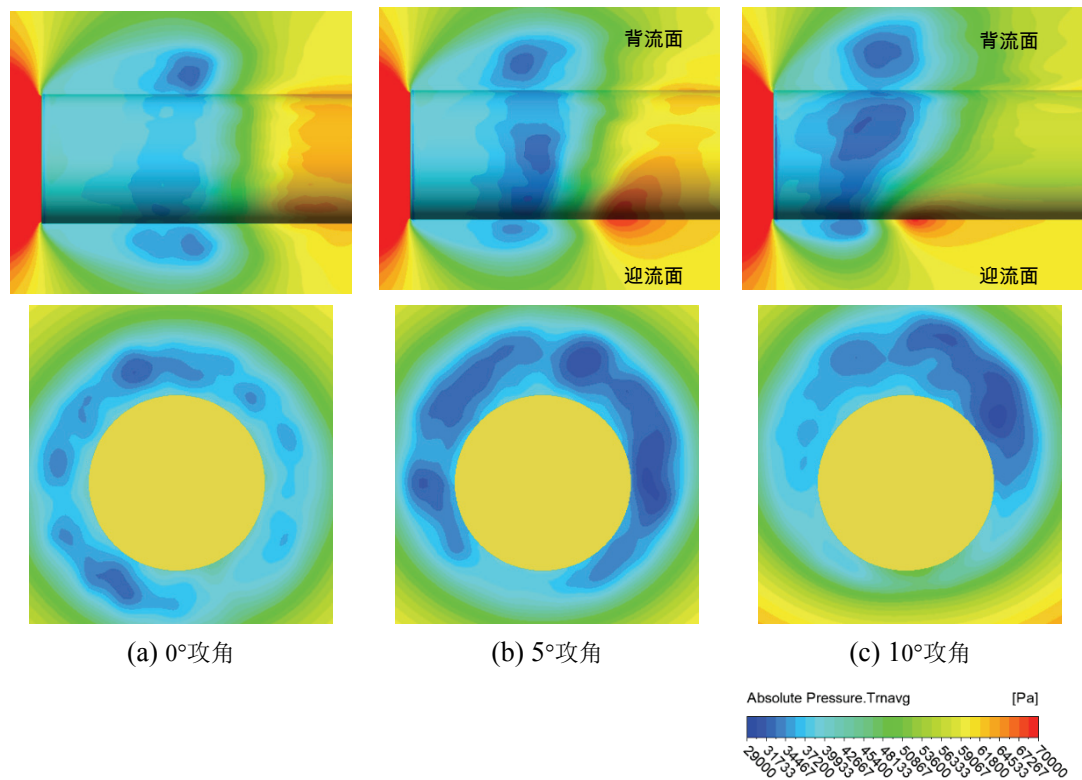


图4 不同攻角条下平头回转体壁面、纵切面及空化区域横切面上的时均压力分布云图

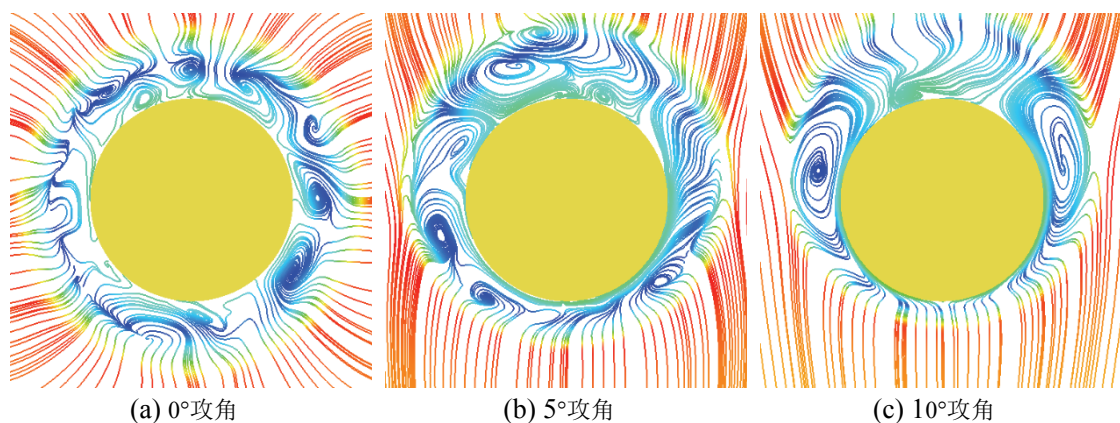


图5 不同攻角条下平头回转体横切面上的时均速度流线图

4 结论

本研究采用 LES 方法对不同攻角条件下绕平头回转体的初生空化流动进行数值计算,研究了不同攻角条件下绕平头回转体初生空化的形态、分布及演变特性,得到以下几点结论如下:

(1) 不同攻角条件下,初生空穴均呈不规则团状游离态分布在回转体的肩部分离涡区域,随着时间的发展,均逐渐长大—收缩—溃灭。另外,空穴在随着主流向下游运动同时会产生周向运动。

(2) 攻角的改变对绕平头回转体初生空穴的周向分布产生明显的影响。随着攻角的增大,初生空穴的分布区域逐渐缩小并且向回转体背流面推移,而回转体两侧区域及迎流区域产生空穴的几率逐渐减小。

(3) 攻角的改变对绕平头回转体的周向流动结构产生明显的影响。随着攻角的增大,绕回转体的漩涡结构由丰富的小尺度漩涡结构逐渐变为较少的大尺度漩涡结构。另外,随着攻角的增大,漩涡结构由随机的旋转方向变为有规律的旋转,促使初生空穴的周向运动由随机性向规律性发展。

参 考 文 献

- 1 权晓波,李岩,魏海鹏,等.大攻角下轴对称航行体空化流动特性试验研究[J].水动力学研究与进展 A 辑,2008(06):662-667.
- 2 季斌,程怀玉,黄彪.空化水动力学非定常特性研究进展及展望[J].力学进展,2019,49(1).
- 3 胡常莉,王国玉,陈广豪,等.绕平头回转体初生空化的实验与数值研究[J].船舶力学,2014,18(Z1):19-27.
- 4 Tsuru W, Konishi T, Watanabe S, et al. Observation of inception of sheet cavitation from free nuclei[J]. Journal of Thermal Science, 2017, 26(3):223-228.
- 5 Liu Z. Cavitation nuclei population and event rates[J]. J. fluids Eng. asme, 1998, 120(4):728-737.
- 6 胡常莉,王国玉,黄彪.绕平头回转体初生空化形态及流场特性研究[C]//第二十五届全国水动力学研讨会暨第十二届全国水动力学学术会议.2013:8.
- 7 刘桦,朱世权,何友声,等.系列头体的空泡试验研究:初生空泡与发展空泡形态[J].中国造船,1995(1):1-10.
- 8 Hu C, Wang G, Wang X, et al. Experimental investigation of inception cavitating flows around axisymmetric bodies with different headforms[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(7):3193-3201
- 9 黄彪,王国玉,胡常莉,等.绕回转体初生空化流场特性的实验及数值研究[J].工程力学,2012,29(06):320-325.
- 10 薛梅新,朴英.高压喷嘴空化初生的大涡模拟[J].工程力学,2013,30(04):417-422.

- 11 Schnerr G H, Sauer J. 2001. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics//Proceedings of 4th international Conference on Multi-Phase Flow, New Orleans.
- 12 Singhal A K, Athavale M M, Li H, Jiang Y. 2002. Mathematical basis and validation of the full cavitation model. *Journal of Fluids Engineering*, 124: 617.
- 13 Zwart P J, Gerber A G, Belamri T. 2004. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics//Proceedings of the 5th International Conference on Multiphase Flow, Yokohama, Japan.
- 14 Wienken W, Stiller J, Keller A. A method to predict cavitation inception using Large-Eddy simulation and its application to the flow past a square cylinder[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2006, 128:316-325.

Study of inception cavitating flows around an axisymmetric blunt body with different angles of attack

YANG Long, HU Chang-li, LUO Qian

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094.Email:18751966052@163.com)

Abstract: In order to investigate the influence of different inflow conditions on the inception characteristics of the attached cavitation, inception cavitating flow around axisymmetric blunt body with different angles of attack was studied by the LES method. The result show that the incipient cavities exhibit a traveling bubbles forming around the shoulder of the blunt body under different angles of attack. During the evolution process, the incipient cavities move downstream, with some circumferential motion. The angle of attack has an effect on the distribution of incipient cavities around axisymmetric blunt body. As the angle of attack increases, the distribution area of incipient cavities gradually shrinks and moves toward the backflow surface of the blunt body, while the probability of the formation of incipient cavities on the upstream and both sides of the blunt body is decrease. In addition, as the angle of attack increases, the circumferential vortex structure around blunt body was changed while the motion of the circumferentially around blunt body is strengthened, and promoting the circumferential motion of the incipient cavities from random to regular.

Key words: inception cavitation; blunt body; angle of attack; circumferential motion