

垂直发射水下航行体的通气空化数值模拟研究

刘涛涛, 黄彪, 王国玉, 张孟杰

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 基于均相流模型对垂直发射水下航行体周围的通气空化流动进行了三维数值模拟, 通过与试验得到的压力数据比较验证了数值方法的可靠性, 并讨论了通气时序对通气空化流场的影响。结果表明: 计算结果与试验吻合较好, 通气能提高空泡内压力且不同位置压力一致, 空泡末端存在回射高压; 随着通气时刻提前, 泡内压力和回射高压增大; 空泡的发展过程伴随着旋涡的形成与演变, 通入空泡的气体有3种流向, 气体的运动导致空泡内产生多个旋涡, 旋涡的种类可以分为3类。

关键词: 数值模拟; 通气空化; 通气时序; 旋涡结构

中图分类号: TV131.3 **文献标志码:** A

文章编号: 2096-4080 (2017) 04-0022-07

Numerical Investigation of Ventilated Cavitating Flows around a Vertical Underwater-launched Projectile

LIU Tao-tao, HUANG Biao, WANG Guo-yu, ZHANG Meng-jie

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The numerical simulation of ventilated cavitating flow around an underwater-launched projectile is performed based on a homogeneous model. The simulated results are compared with experimental results in terms of the pressure. The influence of the timing variation of ventilation rate on ventilated cavity development and flow characteristics is analyzed. The research results show that the numerical results are consistent with the experimental results. Ventilation can improve the pressure inside the cavity and the pressure of different locations tends to be same. With the ventilation time earlier, the pressure inside the cavity and the high pressure of re-entrant jet increase gradually. In addition, the formation and evolution of vortex are captured in the process of cavity development. For gas flow characteristics, the gas injection moves towards three directions. The motion of gas leads to the formation of vortex and the vortex can be catalogued into three types.

Key word: Numerical simulation; Ventilated cavitation; Timing variation of ventilated rate; Vorticity

0 引言

水下航行体垂直发射过程分为3个阶段: 出筒段、水中段和出水段^[1]。其中, 在水中段, 随着水下航行体运行速度的增大, 航行体表面的局部

压力降低, 当压力降低至水的饱和蒸汽压时, 水发生汽化, 形成覆盖航行体的空穴, 即自然空化。空化现象的存在对于高速运动物体的水动力特性具有决定性的影响, 由于自然空化形成的空泡不稳定, 在航行体运行过程中容易受到外界干扰,

收稿日期: 2017-09-19; **修订日期:** 2017-11-01

基金项目: 国家自然科学基金 (51679005)

作者简介: 刘涛涛 (1989-), 男, 博士, 主要研究方向为多相介质复杂流动特性。

Email: liutaotao_0708@126.com

发生断裂脱落等现象,因此会给水下航行体带来很大的流体动力载荷;同时,由于自然空泡泡内压力很低,航行体出水时,空泡发生溃灭产生很高的溃灭压力,给航行体带来很大的冲击。

采用通气空泡来消除自然空化带来的不利影响是水下航行体控制的一项新技术。通过向自然空化形成的空穴中通入不可凝结的气体,来增强空泡的稳定性,提高泡内压力,改善航行体受到的流体动力载荷和溃灭高压。通气空泡是一种非常复杂的高速流动现象,涉及多相流、湍流、质量输运、可压缩性和非定常性等复杂的流动机制^[2]。目前国内外学者研究通气空泡主要通过实验研究和数值模拟两个方面。Semenenko^[3]根据实验结果提出了回射流、双涡以及空泡振荡3种泄气方式,并且确定了3种泄气方式的范围,提出了通气空泡的理论计算公式。Kawakami等^[4]和Wang等^[5]在通气超空泡的形成过程中观测到了两种不同形式的回射流:第一种形式的回射流出现在回射流泄气向双涡管泄气之前,且通入气体量较小时,空泡整体长度较小,呈现出云雾状,气液界面模糊;第二种形式的回射流出现在第一种形式向双涡管泄气转变的过程中,空泡整体呈现出透明状,只有尾部出现小范围的云雾状。Karn等^[6]综合利用高速摄像机和动态压力传感器对通气超空泡的气体泄气方式进行了更为详细的分析,指出通气空泡泄气除了4种基本的稳定泄气方式外,还存在另外5种泄气方式:泡沫状空穴、四涡-回射流泄气、双涡-四涡泄气、双涡-回射流泄气、空泡界面波动-双涡泄气和耦合涡泄气。贾力平等^[7]利用中速可持续通气空泡水洞开展了空化器参数对通气超空泡形态影响的研究。张敏弟等^[8]采用高速全场显示技术和动态应变式测力系统相结合研究了绕圆盘空化器通气空化流动发展过程和动力特性。在数值模拟方面,郭建红等^[9]基于输运类空化模型模拟了绕圆盘的轴对称通气超空泡流。时素果等^[10]采用滤波器湍流模型分析了绕空化器的空泡形态、流动结构和阻力特性。

本文采用CFX软件,对真实水域中垂直发射的高速水下航行体进行了三维数值模拟,通过在控制方程中耦合重力源项考虑重力效应。由于在实际发射过程中,往往在通气前航行体周围已经被发射筒内带出的部分气体覆盖,并伴随着自然空化,因此本文的计算也基于带空泡状态下的航

行体进行。通过与试验压力数据的对比分析验证了计算结果的正确性,讨论了通气时序对通气空化流场的影响,并对空泡发展及流场进行了分析。

1 数值计算方法

1.1 基本控制方程

计算中,采用均相流模型,则质量方程、Favre平均的N-S方程为

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho_m u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\rho_m = \rho_t \alpha_t + \rho_v \alpha_v \quad (3)$$

其中,下标*i*和*j*分别代表坐标方向, ρ_m 、 u 和*p*分别为混合介质的密度、速度和压强, μ 和 μ_t 分别为混合介质的层流和湍流动力黏性系数。

1.2 湍流模型

本文采用工程计算中广泛使用的标准*k-ε*湍流模型,该模型由Launder等于1972年提出^[11],对于均相平衡流动的数值计算,标准*k-ε*模型的控制方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho_m k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m k u_j)}{\partial x_j} = P_t - \rho_m \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \\ & \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho_m \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_t - C_2 \rho_m \frac{\varepsilon^2}{k} + \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\mu_T = \frac{C_\mu \rho_m k^2}{\varepsilon}, \quad C_\mu = 0.09 \quad (6)$$

其中, P_t 为湍动能生成项, k 、 ε 分别为湍动能和湍动能耗散率, μ_T 为湍流黏性系数。模型常数分别为: $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $\sigma_k = 1.0$ 。

1.3 空化模型

Kubota空化模型结合泡间两相流动理论,基于单个空泡生成和发展时空泡体积的变化,基于Rayleigh-Plesset空泡生长方程推导出了如下蒸发和凝结相的表达式:

$$\dot{m}^+ = F_e \frac{3\alpha_{nuc}(1-\alpha_v)\rho_v}{R_B} \left(\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l} \right)^{1/2}, \quad p < p_v \quad (7)$$

$$\dot{m}^- = F_c \frac{3\alpha_v\rho_v}{R_B} \left(\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l} \right)^{1/2}, \quad p > p_v \quad (8)$$

其中, α_{nuc} 为汽核体积分数, R_B 为汽泡半径, p_v 为汽化压强。 F_e 和 F_c 分别是蒸发和凝结经验系数。计算中, 相关的经验系数设定参考 Kubota 的论文^[12]。

1.4 计算域和参数设置

通气装置示意图如图 1 所示, 通气装置位于航行体肩部, 头部为锥形, 计算域的设定如图 2 所示, 入口设定来流速度, 按照航行体运行速度给定; 出口设定压力, 随航行体运行深度而变化; 计算域侧面设定为开放边界。网格划分采用全结构化网格, 由于航行体通气装置结构复杂, 为了控制网格数量, 分别对通气装置和航行体外部流域划分结构化网格, 在计算中通过 interface 将两套网格对接进行计算, 计算总网格为 200 万左右。

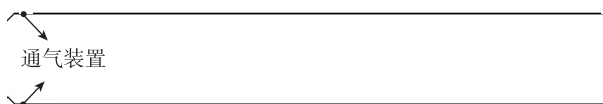


图 1 通气装置示意图

Fig. 1 Sketch of the gas ventilated device

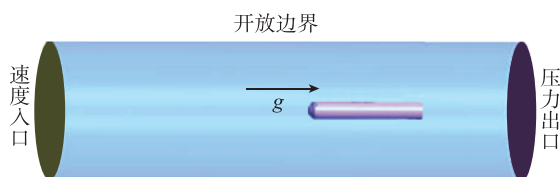


图 2 计算域及边界条件

Fig. 2 Outline of the computational domain with boundary condition

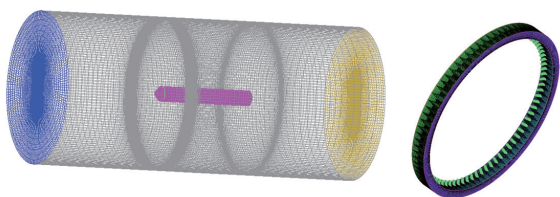


图 3 网格示意图 (左边为外部流域, 右边为通气装置)

Fig. 3 Grids in the computation (Left is out-domain, right is ventilated device)

计算中选取的通气率为 $Q_v = 34.8$, 通气率的

定义为 $Q_v = \frac{Q_{in}}{vS}$, 其中 Q_{in} 为通气体积流量, v 为航行体运行的平均速度, S 为通气面积。

2 结果与分析

2.1 压力分析

图 4 给出了通气时刻, 初始空泡的示意图, A 点为被初始空泡覆盖的测点, B 点、C 点为初始空泡外的测点。图 5 给出了数值模拟和试验中得到的航行体表面压力随时间发展规律的对比图。其中纵坐标为压力系数, 横坐标为无量纲发射时间 t/T , t 为通气后航行体运行的时间, T 为通气时刻至航行体到达水面的总时间。从图 5 可以看出, 数值模拟得到的压力整体变化趋势与实验值吻合较好。

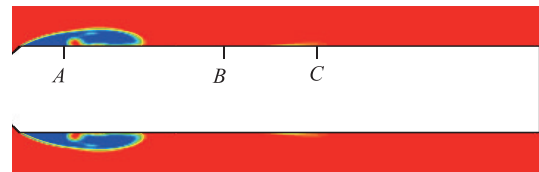


图 4 测点位置示意图

Fig. 4 Positions of monitoring points

对于 A 点, 由于不可凝结气体的通入, 气体的动能瞬间转化为压能, 空泡内压力得到显著提高, 通气空泡发展到稳定阶段后, 压力停止上升, 随着航行体的运行, 环境压力不断降低, 而泡内压力受环境压力的影响也逐渐降低。对于 B 点, 空泡未发展到测点位置时, 压力值随水深减小而下降, 当空泡发展到测点位置时, 压力值上升, 出现一个高压, 这是由于空泡闭合造成的回射高压, 图 6 (a) 中给出了该时刻的压力场和空泡形态图, 可以很清楚地看到 B 点处于空泡闭合处, 且该处有一个高压区。随着空泡继续向后发展, 测点被空泡覆盖, 压力迅速下降至泡内压力, 并随水深减小而下降。对于 C 点, 可以观察到试验值中出现了 2 个高压, 第一个高压是由于航行体完全离开发射筒时水气作用剧烈, 造成空泡外的测点压力集体升高, 本文数值模拟中未考虑出筒, 因此数值模拟值没有观察到这个高压, 除此之外, C 点的变化规律与 B 点一致。值得注意的是, B 测点和 C 测点试验中得到的压力峰值出现时刻总是滞后于数值结果, 这可能是试验过程的不确定外界因素影响了空泡的发展速度, 导致空泡发展至测点的时间延长, 加之压力传感器存在一定的响应时间造成的。

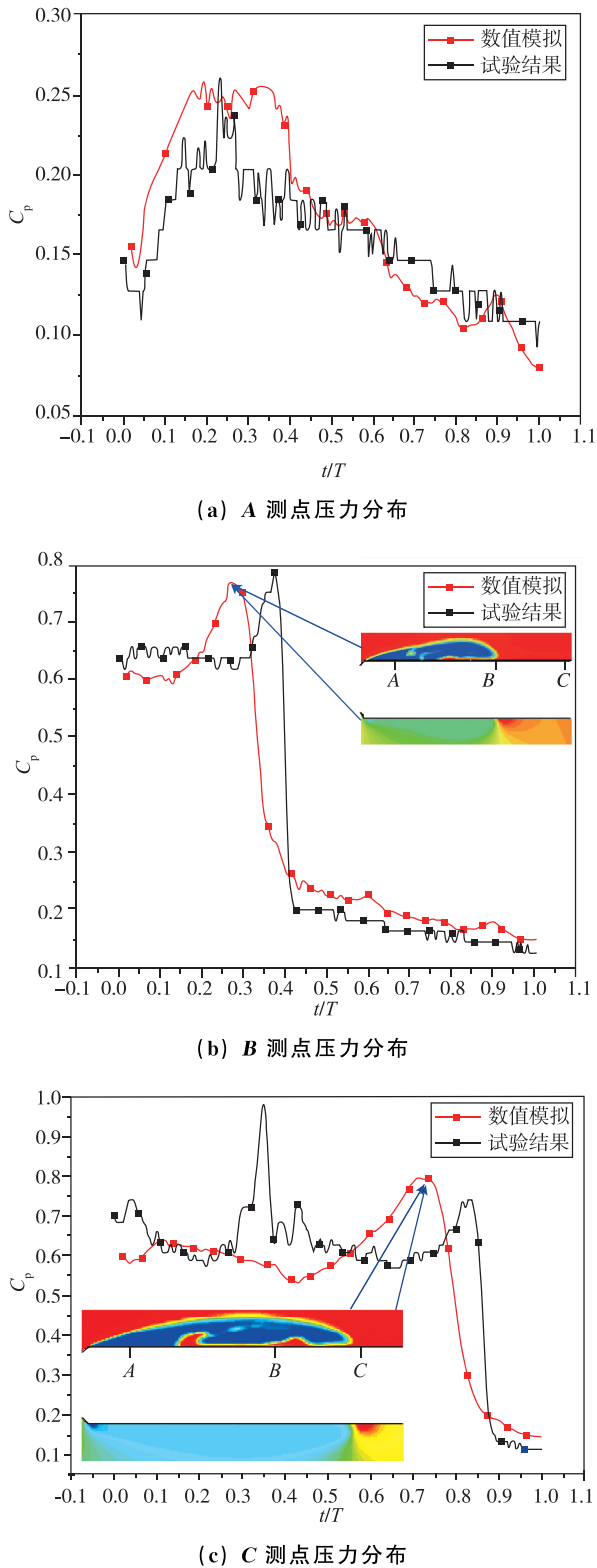


图 5 航行体表面测点压力对比
Fig. 5 Comparisons of the pressure surrounding the vehicle surface in experimental and numerical results

图 6 给出了计算终了时刻，航行体表面压力随轴向位置的变化，其中 x 为距头部距离， L 为航行体轴向长度。从图中可以看出压力变化趋势大

致可以分为 4 个阶段：

1) 压力下降段，此区域对应于航行体头部，其中压力最低点位于其肩部位置，这是流动分离造成的；

2) 压力平直段，此区域对应于航行体表面空泡覆盖位置，其压力值不随水深变化且远小于无空泡的区域；

3) 压力峰值段，此区域对应于空泡尾端，这是由于空泡闭合形成的滞止高压；

4) 压力二次下降段，此区域对应于航行体无空泡区域，其压力值保持为环境压力。

对比数值模拟和试验结果发现，两者在空泡覆盖段吻合较好，在压力峰值段中高压值和高压值出现位置存在一定偏差，即试验测量高压值小于数值结果且出现位置相对滞后，这可能是实验中的测量误差所致。

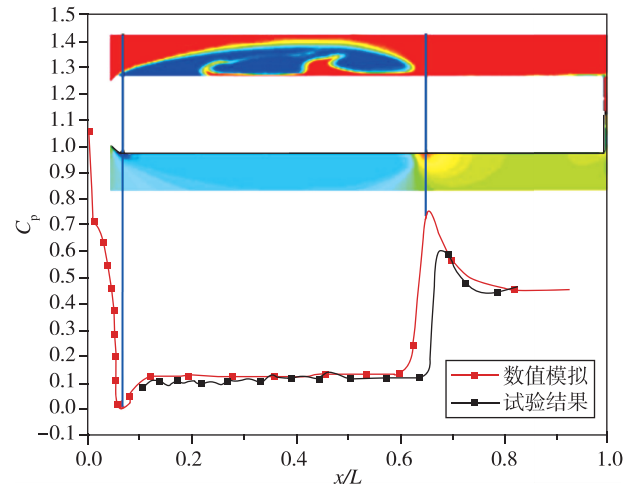


图 6 触水时刻航行体表面压力系数对比
Fig. 6 The pressure surrounding the vehicle surface when touching on the water surface

对于垂直发射的水下航行体，通气时序对空泡发展以及泡内压力有显著影响。本文选取了 4 个不同时刻 t_A 、 t_B 、 t_C 、 t_D 开始通气，分别进行了计算，其中 $t_A < t_B < t_C < t_D$ 。图 7 给出了计算终了时刻航行体的表面压力分布曲线，压力变化趋势与图 6 所示基本一致。从图 6 中可以发现，随着通气时刻提前，回射高压出现的位置向后移动，说明空泡长度变大，这是由通气总质量决定的；同时，空泡内压力值和回射高压均增大。由于靠近航行体尾部，水深增大，环境压力增大，而空泡内压力和回射高压均与环境压力成正比，故空泡内压力和空泡尾部回射高压均增大。

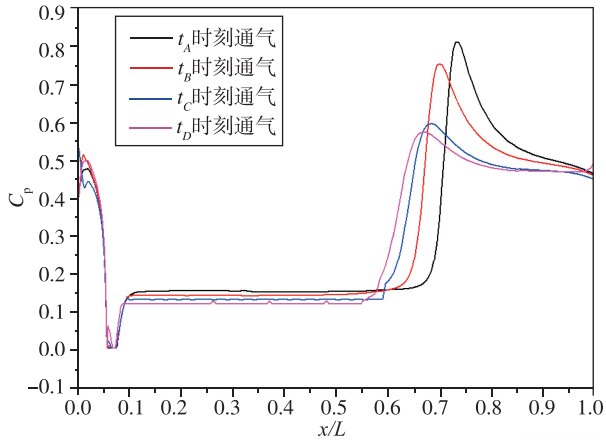


图7 不同通气时序下航行体的表面压力
Fig. 7 The pressure surrounding the vehicle surface of different timing variation of ventilation rate

2.2 通气对空泡发展的影响

2.2.1 空泡形态分析

为了进一步分析通气对空泡形态的影响，图8给出了通气之后空泡形态的变化过程， t_0 为通气时刻， t_0 为航行体触水时刻。通气前，航行体前半部有较小尺度的空泡覆盖，通气之后，空泡的中前段首先发生膨胀，直径增大，产生一个环状的凸起，随着航行体运行，环状凸起逐步向空泡后半段移动，同时空泡的长度和直径增大， t_5 时刻，环状凸起移动到空泡末端，之后空泡形状稳定，空泡长度和直径继续增大。

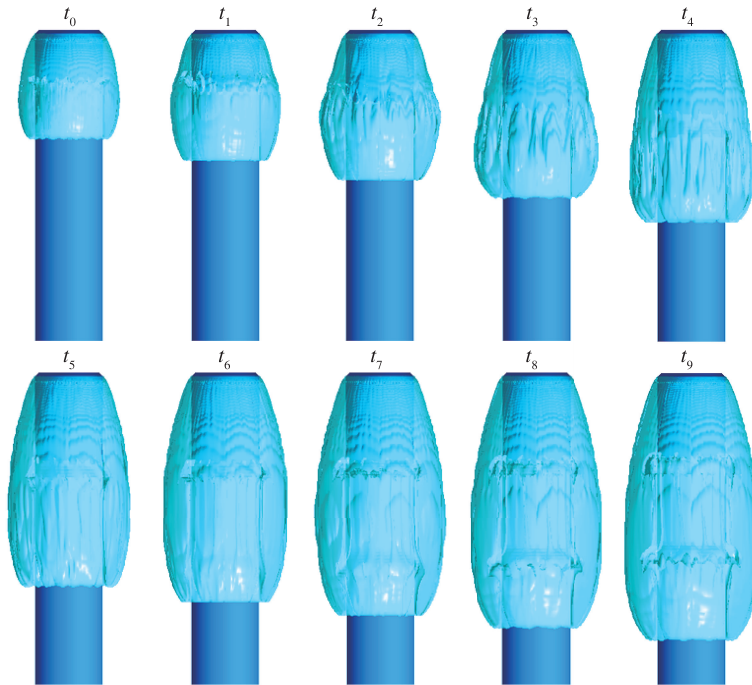


图8 空泡形态随时间的演变过程
Fig. 8 Time-evolution process of cavity shapes

图9给出了空泡长度的变化曲线，其中 x_1 为空泡长度。从图9中可以看出， $t_0 \sim t_3$ 时刻，由于通气引起的环状凸起离空泡末端较远，空泡增长的速度基本不变，空泡长度呈线性增大； $t_3 \sim t_4$ 时刻，环状凸起移动到了空泡后端，在这部分气体的挤压作用下，空泡增长的速度有一个瞬时的提升； $t_4 \sim t_6$ 时刻，环状凸起继续向末端移动，空泡的增速变慢； t_6 时刻之后，环状凸起移动到末端，空泡增长速度基本不变。

2.2.2 旋涡结构分析

图10给出了整个空泡内的流线图，并用黑色实线表示空泡的轮廓。图11给出了通气装置附近

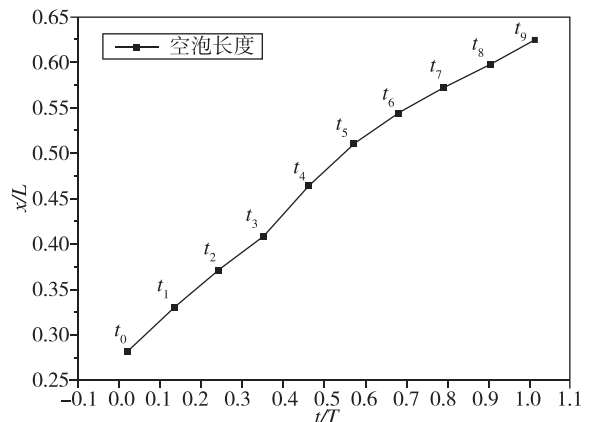


图9 空泡长度随时间的变化
Fig. 9 Time-evolution process of cavity length

的流线图，以便观察通入气体的流向。结合图 10、图 11 可以看出，空泡的发展过程伴随着旋涡的形成与演化，通气空泡内大体存在 3 类旋涡：I) 靠近通气孔紧贴壁面，其尺度较小（图 10 蓝色虚线）；II) 靠近空泡闭合端，其尺度较大，延伸至空泡中部（图 10 红色虚线）；III) 对于大尺度的空泡，空泡中部还存在若干个小旋涡，数量随空泡尺度增大而增加（图 10 黑色虚线）。

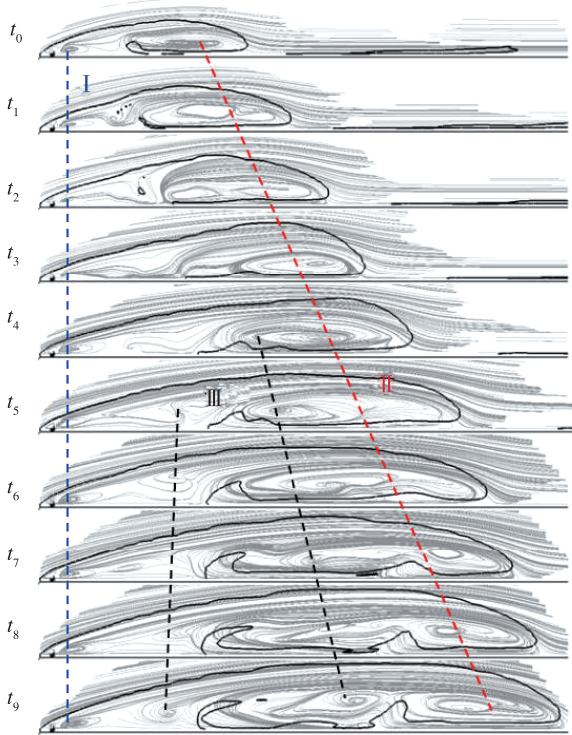


图 10 空泡内流线图

Fig. 10 Streamline patterns inside the cavity

通入的气体在空泡内的运动分为 3 种流向：a) 从通气孔流出后反向朝航行体肩部流去，这是

因为肩部存在流动分离造成的低压区，气体到达空泡边缘后再次反向，变为贴壁向后流动（图 11 蓝色实线）；b) 从通气孔流出后随主流向后运动，到达空泡尾部后闭合（图 11 红色实线）；c) 从通气孔流出后遭遇主流阻碍，贴壁形成反向射流，在通气孔后部形成旋涡（图 11 绿色实线）。

旋涡是由主流和贴壁的反向射流的相互作用引起的，当主流强度增加时，旋涡收缩，当主流强度减弱时，旋涡扩大。对于通气孔附近的旋涡，即第 1 类旋涡，由图 11 可以看出， $t_0 \sim t_3$ 时刻，旋涡尺度明显减小，这是因为气体通入后，反向朝航行体肩部流去，对旋涡起到压迫作用。第 1 类旋涡的收缩使得整个空泡有收缩的趋势，造成初始阶段空泡长度增速较慢。 t_4 时刻之后，第 1 类旋涡尺度恢复到初始大小，这是由于通气孔流出的一部分气体遭遇主流阻碍，贴壁形成反向射流，在通气孔后部形成旋涡。当主流强度与反向射流强度达到平衡后，旋涡恢复初始状态，不随空泡尺度增大而改变。对于空泡闭合端的旋涡，即第 2 类旋涡，此旋涡是由于气体从通气孔流出后随主流向后运动，到达空泡尾部后闭合所形成。由图 10 可以看出，其随着空泡尺度的增大而增大，这是因为空泡尺度增大，空泡闭合端的主流强度减弱。当第 2 类旋涡增大到一定程度后会发生分裂，形成 2 个新的旋涡，同时，空泡增大到一定程度后，到达空泡尾部的气体随着反向射流进入空泡内部，与通气孔后部出流气体产生的旋涡相互作用，导致第 1、2 类旋涡之间的区域会出现新的小旋涡，两种因素共同导致了第 3 类旋涡的生成，如图 10 中 t_7 时刻所示。

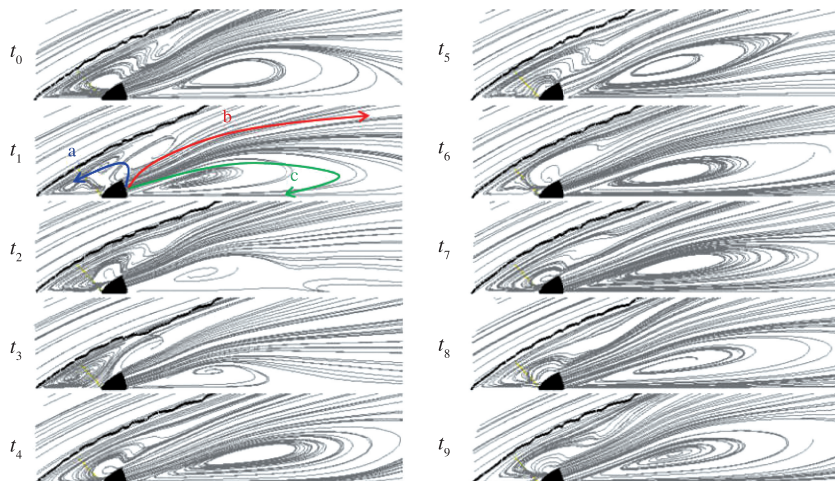


图 11 通气装置附近流线图

Fig. 11 Streamline patterns near the ventilated hole

3 结论

本文采用CFX软件对垂直发射的水下航行体进行了三维数值模拟,并对改变通气时序的影响进行了分析,结果表明:

1) 通气能提高泡内压力,通气空泡内不同位置的压力值基本一致;通气空泡末端存在回射高压,航行体肩部存在低压区;随着通气时刻提前,终止时刻泡压和回射压力增大。

2) 通气后空泡产生环状凸起,环状凸起向空泡尾部运动,导致空泡长度增加。

3) 通入气体在空泡内有3种流向:向肩部运动、随主流向空泡闭合端运动、形成反向射流;空泡内旋涡分为3类:通气孔附近、空泡闭合端、空泡中部。通气孔附近旋涡不随空泡增长而变化,空泡闭合端旋涡随空泡增长而增大,进而发生分裂,空泡中部的旋涡数目随空泡增长而增加。

参考文献

- [1] 黄寿康. 流体动力-弹道-载荷-环境 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 1991.
- [2] 刘筠乔, 鲁传敬, 李杰, 等. 导弹垂直发射出筒过程中通气空泡流研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2007, 22 (5): 549-554.
- [3] Semenenko V N. Artificial supercavitation: physics and calculation [D]. Ukrainian Academy of Sciences, Kiev Inst of Hydromechanics, 2001.
- [4] Kawakami E, Arndt R E A. Investigation of the behavior of ventilated supercavities [J]. Journal of Fluids Engineering, 2011, 133 (9): 091305.
- [5] Wang Z Y, Huang B, Wang G Y, et al. Experimental and numerical investigation of ventilated cavitating flow with special emphasis on gas leakage behavior and re-entrant jet dynamics [J]. Ocean Engineering, 2015, 108: 191-201.
- [6] Karn A, Arndt R E A, Hong J. An experimental investigation into the physics of supercavity closure [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 789: 259-284.
- [7] 贾力平, 王聪, 于开平, 等. 空化器参数对通气超空泡形态影响的实验研究 [J]. 工程力学, 2007, 24 (3): 159-164.
- [8] 张敏弟, 邵峰, 郭善刚, 等. 绕空化器通气空化流场的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2011, 32 (10): 1673-1676.
- [9] 郭建红, 鲁传敬, 陈瑛, 等. 基于输运方程类空化模型的通气空泡流数值模拟 [J]. 力学季刊, 2009, 30 (3): 378-384.
- [10] 时素果, 王国玉, 余志毅, 等. FBM湍流模型在非定常通气超空化流动计算中的评价与应用 [J]. 船舶力学, 2012, 16 (10): 1099-1106.
- [11] Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows [J]. Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3 (2): 269-289.
- [12] Kubota A, Kato H, Yamaguchi H, et al. Unsteady structure measurement of cloud cavitation on a foil section using conditional sampling technique [J]. Journal of Fluids Engineering, 1989, 111 (2): 204-210.