

论文

通气对云状空化不稳定性调节中的控制参数与影响规律研究

于嫻嫻, 王一伟*, 黄晨光, 杜特专

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

*联系人, E-mail: wangyw@imech.ac.cn

收稿日期: 2014-05-03; 接受日期: 2014-05-26; 网络出版日期: 2015-01-20

国家自然科学基金资助项目(批准号: 11332011 和 11202215)

摘要 水下高速运动的航行体面临着空化现象, 出现空泡的脱落和溃灭, 带来噪声、振动等不稳定性影响. 向空泡中通入气体是调节空化流场不稳定性的重要手段. 本文对通气空化进行量纲分析, 得到了影响通气空化的无量纲参数. 通过数值模拟研究了与通气相关的两个重要无量纲数—通气与来流的质量流量之比和动量流量之比对流动稳定性的影响. 数值研究表明, 通气质量流量对于空化的演化过程有较大的影响. 随着通气质量流量的增大, 泄气方式从空泡泄气转变为气层泄气. 通气质量流量的提高可削弱回射压力, 增强航行体表面压力的稳定性, 但同时会增加阻力值以及阻力的波动性. 通气的动量流量对空化的演化和航行体的压力影响较小, 但是在一定程度上可以降低阻力, 提高阻力的稳定性.

关键词 通气空化, 不稳定性, 量纲分析, 质量流量, 动量流量

PACS: 47.10.ad, 47.11.Df, 47.55.dp, 47.85.lb

doi: 10.1360/SSPMA2014-00334

1 引言

1.1 研究背景

当航行体在水下高速运动导致周围环境压力低于饱和蒸汽压(约 2500 Pa)时, 周围的水就会汽化, 发生空化现象. 空化过程中空泡的脱落和溃灭, 会引起较大的压力波动, 影响流场的稳定性, 干扰机械的正常运行.

向已形成的空泡中通入不可凝结气体是一种人工空化技术. 通气空化可以增加空泡内的压力, 降低

空化数, 提高空化的稳定性. 因此通气已经成为一项重要的调节空化流场不稳定性研究方法, 人们对通气下的通气云状空化, 超空化以及减阻作用等进行了大量的研究.

Ceccio^[1]从实验和数值模拟两方面总结了轴对称物体的局部空化和超空化的研究现状, 从基本控制参数、通气作用、空泡的稳定性等多个方面综述了自然空化以及通气空化的机理和对航行体减阻的作用.

对于通气云状空化以及影响参数规律, Kozlov 等人^[2]通过实验研究了在小空化数下通气空化的动力

引用格式: 于嫻嫻, 王一伟, 黄晨光, 等. 通气对云状空化不稳定性调节中的控制参数与影响规律研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 034703
Yu X X, Wang Y W, Huang C G, et al. Parameters and influence of gas injection on modification of cavitation stability (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 034703, doi: 10.1360/SSPMA2014-00334

学行为, 将空泡闭合区域的压力分布、空化数以及“流动压头”描述为通气速率的函数并记录了空泡边界形态, 结果表明, 通气空化的泄气与 Rayleigh-Taylor 不稳定性有关, 泄气系数与空泡边界的曲率以及边界长度的平方成比例.

Wang 等人^[3]对回转体通气云状空化进行了研究, 发现了在通气和回射流作用下, 通气云状空化发展过程中空泡部分脱落的现象, 并进行了相关机理的分析; Matveev 等人^[4]对水面船体下方通气空化进行了实验和数值的研究, 发现通气空化的空泡长度对系统参数表现敏感, 空泡长度随着来流速度和通气量的增加而增长, 并在高速来流时表现为二维增长的特性; 不同船体攻角下的结果表明存在攻角最优值使空泡面积最大; 另外在其数值模拟中采用了简单低耗的一维势流模型, 且结果与实验吻合良好. Ji 等人^[5,6]提出了“三分量”空化模型来捕捉空泡的发展, 研究发现, 不可凝结气体的通气速率影响通气空化的发展, 随着通气速率的增加, 空泡会较为显著的被抑制; 顾巍等人^[7]对空泡流非稳态现象的流动控制进行了实验研究, 尝试了在水翼表面粘附挡流条以影响整个空泡流的形态及其流动稳定性, 并从试验研究的角度探索了空泡云脱落的机理.

对于通气超空化, 王海滨等人^[8]通过实验对轴对称航行体通气超空泡的特性进行了研究, 分析了通气空泡与通气率、重力和阻力系数的关系. 于开平课题组^[9,10]通过实验和数值模拟研究了重力对于超空泡形态的规律性影响以及通气空化数对于减阻效果的影响, 认为通气率增加可以提高减阻效果; Semenenko^[11]根据实验和理论研究提出了双涡、涡环以及空泡振荡 3 种不同的泄气方式. 涡环泄气是通气超空化形成后出现的泄气方式. 空泡振荡泄气是由于过高的气体通量引起空泡失稳从而使气团从空泡尾部脱落. 对于空化的减阻作用, Amromin^[12]通过求解边界层积分方程并与实验数据对比, 研究了局部空泡减阻和微气泡减阻的协同作用.

目前针对通气空化的研究已经取得了很多有价值的成果, 研究主要集中在通气空化的减阻作用和稳定性, 重力等环境因素对通气空化的影响上等, 且研究对象主要是超空化, 而对于通气本身的条件对云状空化影响的研究则较少.

1.2 研究内容

在本文工作之前, 我们对轴对称航行体通气云

状空化这种复杂的气-汽-液多相流现象进行了数值和实验研究^[12](图 1). 向空泡中通入气体, 可以使航行体肩部存在持续性的空泡, 而只在空泡尾部出现局部的准周期性脱落和溃灭. 通过分析, 获得了通气对流动的控制效果以及局部不稳定性机理. 在此工作的基础上, 本文进一步开展了通气对云状空化不稳定性调节中的控制参数与影响规律研究. 对通气空化进行量纲分析, 得到控制通气空化的无量纲参数, 然后通过数值模拟研究了与通气相关的 2 个重要无量纲量——通气与来流的质量流量之比、动量流量之比——对通气空化的影响.

2 量纲分析

通气空化作为一种复杂的现象, 涉及环境参数(如重力、各相温度等), 航行体本身几何参数(如长度、锥角等), 运动参数(如航行体速度)等多方面的变量. 假设在空化过程中, 空泡的长度为 l , 则

$$l = f \left(t; \rho_w, v_w, T_w, D; \rho_a, v_a, T_a, A_a; \gamma, H_0, \alpha_0, \lambda_w, c_{pw}, \lambda_a, c_{pa}; p_\infty, p_v, g, T_s, \mu, H, \alpha_c, L \right), \quad (1)$$

其中 t 表示作用时间, ρ_w, v_w, T_w 分别表示水的密度, 速度和温度; D 表示航行体的直径; ρ_a, v_a, T_a 表示通入空气的密度, 速度和温度; A_a 表示通气口的面积; γ 表示比热比; H_0 表示潜热; α_0 表示换热系数; λ_w, c_{pw} 和 λ_a, c_{pa} 分别表示水和空气的传热系数和热容; p_∞ 表示远场压力; p_v 表示饱和蒸汽压; g 为重力加速度; T_s 为表面张力; μ 表示流体的黏性; H 表示水深; α_c 表示锥角; L 表示回转体长度.

引入变量 $T = T_w - T_a$ 表示水与空气的温差. 选定 ρ_w, v_w, D, T 为基本量, 则

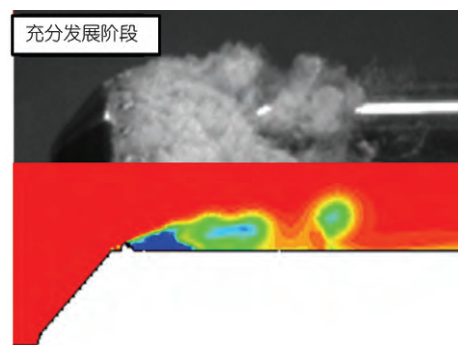


图 1 (网络版彩图)轴对称航行体通气空化实验与数值模拟^[12]
Figure 1 (Color online) Experiment and simulation of ventilated cavitation around axisymmetric body [12].

$$\frac{l}{D} = f \left(\begin{array}{l} \left(\frac{tv_w}{D}, \frac{\rho_a}{\rho_w}, \frac{v_a}{v_w}, \frac{A_a}{D^2}; \gamma, \frac{\alpha_0}{\rho_a c_{pa} v_a}, \frac{\lambda_w}{\rho_w c_{pw} D v_w} \right), \\ \frac{\lambda_a}{\rho_a c_{pa} A_a \frac{1}{2} v_a}, \frac{c_{pa}}{c_{pw}}, \frac{\rho_a c_{pa} T}{H_0 \rho_w}, \frac{\rho_w v_w^2 D}{T_s}; \\ \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2} \rho_w v_w^2}, \frac{gH}{v_w^2}, \frac{\rho_w v_w D}{\mu}; \frac{H}{D}, \alpha_c, \frac{L}{D} \end{array} \right), \quad (2)$$

将无量纲量进行组合变换, 可得

$$\frac{l}{D} = f \left(\begin{array}{l} \left(\frac{tv_w}{D}, \frac{\rho_a v_a A_a}{\rho_w v_w D^2}, \frac{\rho_a v_a^2 A_a}{\rho_w v_w^2 D^2}, \frac{\rho_a v_a^3 A_a}{\rho_w v_w^3 D^2}; \right. \\ \left. \gamma, \frac{\alpha_0}{\rho_a c_{pa} v_a}, \frac{\lambda_w}{\rho_w c_{pw} D v_w}, \frac{\lambda_a}{\rho_a c_{pa} A_a \frac{1}{2} v_a} \right), \\ \frac{c_{pa}}{c_{pw}}, \frac{\rho_a c_{pa} T}{H_0 \rho_w}, \frac{\rho_a v_a A_a}{\rho_w v_w D^2}, \frac{\rho_w v_w^2 D}{T_s}; \\ \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2} \rho_w v_w^2}, \frac{gH}{v_w^2}, \frac{\rho_w v_w D}{\mu}; \frac{H}{D}, \alpha_c, \frac{L}{D} \end{array} \right), \quad (3)$$

其中, $\rho_a v_a A_a / \rho_w v_w D^2$ 表示通气的质量流量(每秒流经指定截面的质量)与来流的质量流量之比. $\rho_a v_a^2 A_a / \rho_w v_w^2 D^2$ 表示通气的动量流量(每秒流经指定截面的动量)与来流动量流量之比, $\rho_a v_a^3 A_a / \rho_w v_w^3 D^2$ 表示通气的能量流量(每秒流经指定截面的能量)与来流的能量流量之比, 以上三者表示通气空化的动力学影响因素. 其余无量纲量, 如 H/D 和 α_c 表示航行体形状的影响; $\lambda_w / D \rho_w c_{pw} v_w$, $\alpha_0 / \rho_a c_{pa} v_a$ 等表示温度的影响. 对于通气空化的发展, 一方面相变是由于压力场降低至饱和蒸汽压导致的, 温度影响较小; 另一方面, 气体的通入是由于航行体运动之后形成的内外流场压差自然实现的, 通入的是常温常压气体, 虽然由于气体的稍微膨胀会引起气体的能量和温度变化, 但是相对于周围水的热容还是非常小的, 因此忽略了温度的影响. 对于通气云状空化动力学方面的因素是重要的影响参数. 所以本文主要研究通气与来流的质量流量之比 $\rho_a v_a A_a / \rho_w v_w D^2$ 和动量流量之比 $\rho_a v_a^2 A_a / \rho_w v_w^2 D^2$ 对于整个过程的影响.

3 数学模型

3.1 控制方程

本文研究的通气空化流场涉及液、汽、气三相的

混合, 为了模拟 3 种组分及其相变, 采用单一流体多种组分的混合物模型^[13], 用体积分数 α 表征各相的占有率. 模型的控制方程如下:

质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0, \quad (4)$$

其中, $\rho_m = \alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v + \alpha_g \rho_g$ 为混合物的密度,

$$\mathbf{v}_m = \frac{\alpha_l \rho_l \mathbf{v}_l + \alpha_v \rho_v \mathbf{v}_v + \alpha_g \rho_g \mathbf{v}_g}{\rho_m}$$

为混合物的平均速度. 下标 l, v, g 分别代表液相、汽相和气相, 三相体积分数满足 $\alpha_l + \alpha_v + \alpha_g = 1$.

动量守恒方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) \\ = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T) \right] + \mathbf{F}. \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\mu_m = \alpha_l \mu_l + \alpha_v \mu_v + \alpha_g \mu_g$ 为混合物的黏性系数, \mathbf{F} 为体力项.

通入气体的输运方程和状态方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m f_g) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m f_g) = 0, \quad (6)$$

$$\rho_g = \frac{p}{RT}. \quad (7)$$

3.2 空化模型

在空化流动中, 低压相变区的密度发生迅速的变化, 并涉及空泡的形成与输运、压力与速度的脉动以及不可凝结气体. Singhal 等人^[14]考虑了所有这些因素, 提出的完全空化模型, 引入水蒸汽输运方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \alpha_v) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \alpha_v) = R_e - R_c, \quad (8)$$

$$R_e = C_e \frac{\sqrt{k}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(p_v - p)}{3\rho_l}} (1 - f_v - f_g), \quad (9)$$

$$R_c = C_c \frac{\sqrt{k}}{\sigma} \rho_l \rho_l \sqrt{\frac{2(p - p_v)}{3\rho_l}} f_v. \quad (10)$$

式中 R_e 表示空化率, R_c 表示凝结率, k 为当地的湍动能, σ 为空泡表面张力系数, C_e, C_c 为经验常数, 分别取 0.02, 0.01.

3.3 湍流模型

本文采用 RNG k- ϵ 模型求解关于湍动能及耗散

率的输运方程. 由于原始的RNG k- ϵ 模型在空化区的黏性远大于实际情况, 耗散过强, 因此根据 Dular 等人^[15]和 Reboud 等人^[16]的文献, 对模型进行了修正.

上述计算方法已在文献[13]中得到了验证.

4 数值计算

4.1 计算模型、网格划分和边界条件

本文延用文献[13]中的计算模型(图 2). 计算模型为半无限长轴对称锥头圆柱体, 直径为 37 mm. 为实现通气, 在模型肩部周向设置 16 个喷管, 喷管外径 1.5 mm, 内径 1.0 mm. 计算域采用分块的结构化网格进行划分, 网格数为 4.5 万. 航行体头部前方的外流场为 1/4 圆, 半径 200 mm. 入口速度设为 16.6 m/s, 出口为常压力, 喷口边界设置为质量流量入口, 具体设置参见表 1.

4.2 计算方法

根据物理问题确定相关计算参数. 计算涉及液汽三相的相互作用. 在计算过程中, 选用完全空化模型来模拟液汽的相互转变, 气相为可压缩的理想气体. 考虑到可压缩性和计算的效率, 采用了 SIMPLEC 算法; 考虑到计算的精度, 对动量方程采

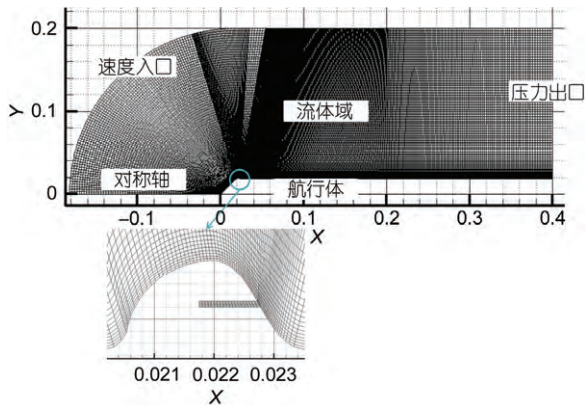


图 2 计算域及网格示意图

Figure 2 Computational domain and mesh.

表 1 边界条件设置(背景压力 1 atm)

Table 1 Boundary conditions (operating pressure: 1 atm)

边界条件	设置
流体域	液、汽、气混合物
速度入口	16.6 m/s
压力出口	0 Pa
航行体表面	无滑移壁面

用二阶精度的迎风格式. 初始计算阶段, 空化发展不充分, 航行体气腔与外流场压力相差不大, 此时不采取通气, 喷口处边界设为壁面条件. 当计算至 0.5 ms 时, 喷管外侧空化发展较为充分, 内外压差加较大, 此时将喷口处的边界条件改为内部条件, 气腔内部的气体在压差的作用下喷出, 实现通气.

4.3 计算算例

在数值计算时, 来流的流动条件固定不变, 即来流的质量流量和动量流量固定不变. 通过改变喷口的边界条件等来改变通气的质量流量和动量流量, 以实现不同的质量流量之比(设为 M_1)和动量流量之比(设为 M_2)的计算.

本文计算算例分为以下两部分: 一是在固定气体动量流量的前提下, 将喷口的边界条件设置为质量流量入口, 通过改变通气质量流量, 研究质量流量对空化的影响(表 2); 二是设置并固定喷口的通气质量流量, 通过改变气体的摩尔质量来改变气体的速度进而改变动量流量, 研究通气动量流量对空化的影响(表 3).

5 结果与讨论

5.1 通气质量流量与动量流量对演化过程的影响

自然空化^[17]和局部通气空化都伴随着周期性现

表 2 喷口动量流量固定, 改变质量流量

Table 2 Gas-injection momentum flux is fixed, mass flux changes

算例	通气动量流量 (10^5 kg m/s ²)	通气质量流量 (kg/s)	通气与来流质量 流量之比 M_1
1.1	3.20	0.002	1.12
1.2	3.18	0.004	2.25
1.3	3.20	0.006	3.39
1.4	3.21	0.008	4.50
1.5	3.18	0.020	11.2

表 3 喷口质量流量固定, 改变动量流量

Table 3 Gas-injection mass flux is fixed, momentum flux changes

算例	通气质量流量 (kg/s)	通气动量流量 (10^5 kg m/s ²)	通气与来流动量 流量之比 M_2
2.1	0.002	2.96	10.0
2.2	0.002	3.38	11.4
2.3	0.002	3.82	13.0
2.4	0.002	4.19	14.1
2.5	0.002	4.76	16.1

象, 如空泡的周期性脱落和溃灭.

在通气空化过程中, 与通气相对应的也有泄气现象的存在. 向空泡内通入的气体不会持续地滞留于空泡内部, 到达一定程度时就会从空泡内部逸出, 即发生泄气现象. 泄气与尾部空泡的脱落是相互作用的; 通气与泄气作为相对应的物理现象, 在通气空化充分发展时两者应达到相互平衡的状态; 同时空泡的脱落也受到泄气的影响. 因此, 在通气空化的整个演化过程中, 通气、空泡脱落与泄气三者是相互影响的, 存在复杂的作用机制.

5.1.1 质量流量对演化过程的影响

图 3 表示了在不同通气质量流量之比 M_1 下, 通

气空化的演化过程, 各演化云图中时间间隔为 2.5 ms. 由对图 3 中各种工况的分析发现, 在通气空化中主要有两种泄气方式: 一是空泡泄气, 气体包裹在尾部空泡中, 随着空泡的脱落而泄出, 因此这种方式是周期性的(图 3(a)). 空泡泄气与 Semenenko^[11]提出的空泡振荡泄气在本质上是一致的. 二是气层泄气, 在航行体表面形成一层气体含量较高的气层, 气体经过此贴壁气层从航行体尾部泄出, 这种泄气方式是持续性的(图 3(e)). 气层泄气与 Semenenko^[11]提出的涡环泄气有一定的区别. 气层泄气是形成通气超空化的过程中不可避免的现象. 涡环泄气是在形成通气超空化之后为了维持其稳定性, 在超空泡尾部出现的现象.

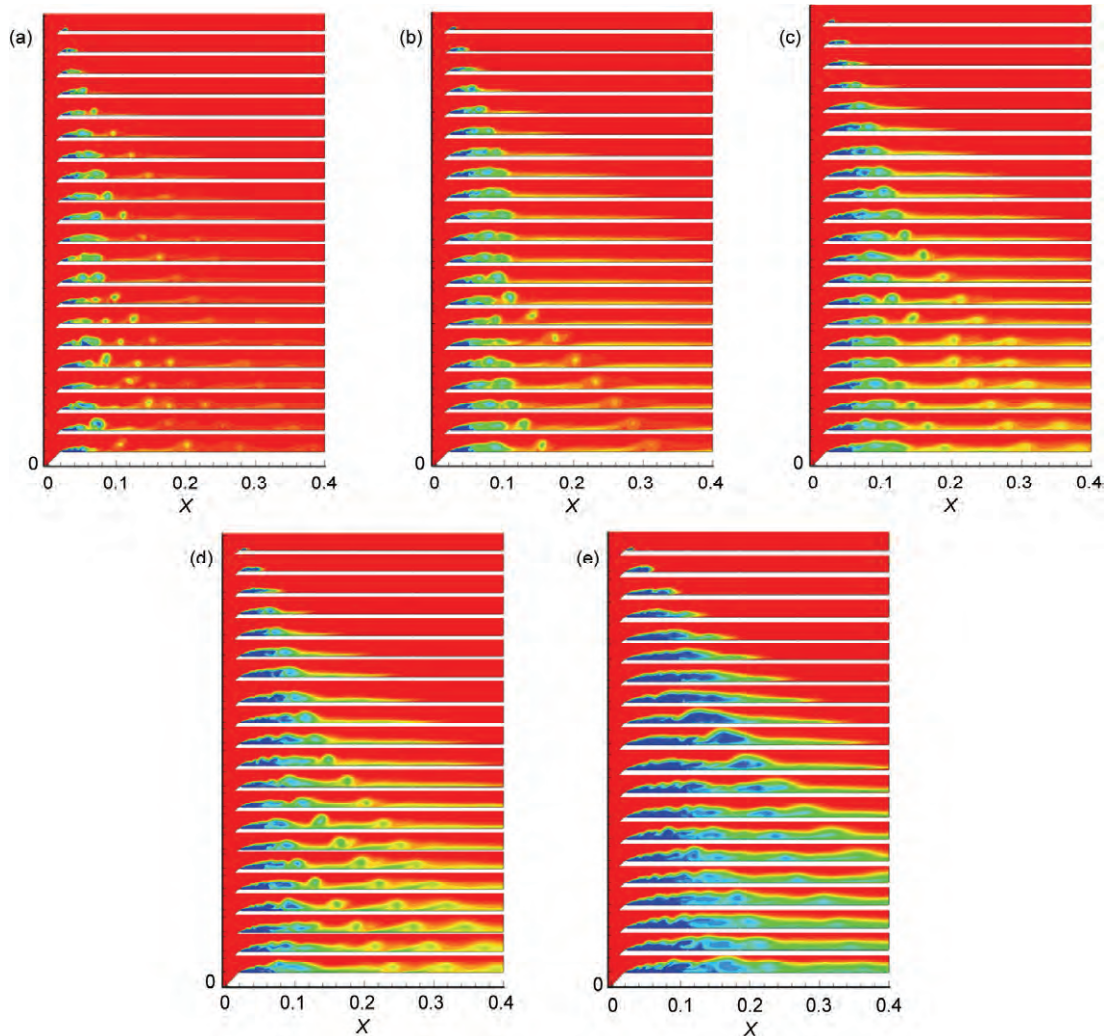


图 3 (网络版彩图)不同质量流量之比 M_1 下通气空化演化云图. (a) $M_1=1.12$, (b) $M_1=2.25$, (c) $M_1=3.39$, (d) $M_1=4.50$ 和 (e) $M_1=11.2$
Figure 3 (Color online) Evolution of ventilated cavitation at different M_1 . (a) $M_1=1.12$, (b) $M_1=2.25$, (c) $M_1=3.39$, (d) $M_1=4.50$ and (e) $M_1=11.2$.

随着通气质量流量的增大, 航行体的主导泄气方式发生转变, 据此本文将通气空化的演化可以分为以下两种情况.

在阶段一, 如图3中的(a)–(d) 4种工况, 可以发现, 一方面随着质量流量之比 M_1 的增大(由1.12增大到4.50), 尾部空泡脱落的位置逐渐后移, 脱落频率加大, 空泡之后航行体壁面附近同时出现的空泡数量增加; 另一方面空化过程中, 出现明显的周期性的尾部空泡脱落现象, 因此泄气的主要方式是空泡泄气. 与此同时也可以观察到在航行体表面出现较薄的气层. 此时的通气空化, 在航行体头部存在持续的空泡, 在空泡尾部表现出明显的准周期性局部脱落. 且随着通气质量流量的提高, 脱落的气泡逐渐变大, 肩部的持续空泡变长, 空泡内部的气体含量增高同时脱落气泡之间的气层也逐渐变得明显, 气层泄气的作用逐渐显著.

通气质量流量的增大明显的影响到空泡脱落, 这是由于气体质量的增大影响到空化数.

$\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2}\rho v^2}$ 是描述空化现象的重要参数. 其中, p_∞ 表

示远场压力, p_v 代表空泡内部的压力, ρ 和 v 分别是当地的密度和速度. 随着通气质量流量的增加, 空泡内部气体质量增多, 导致泡内压力 p_v 增大, 空化数降低, 使空化现象加剧, 从而空泡脱落频率加大. 此外, 在动量流量固定的前提下, 空泡内部气体含量增多也对空泡起到一定的吹胀作用, 从而也使空泡增大, 脱落位置后移. 另一方面, 空泡脱落频率的增大提高了泄气的速度, 这也与通气质量的增加相对应, 可使通气泄气达到一种平衡的状态. 综上, 在此阶段, 质量流量的增大导致空泡脱落速率的提高; 空泡脱落速率的提高加快泄气的速度; 泄气速度的增大又与通气质量流量的增加相平衡.

在阶段二, 当 $M_1=11.2$ 时, 如图3(e)所示, 可以明显看出, 在航行体表面形成了较厚的明显的连续气层, 虽然在较厚的气层中仍然可以看到空泡, 但此时的主要泄气方式是气层通气. 随着通气质量流量的增大, 依赖空泡周期性脱落的泄气方式已经无法满足较高的通气量, 过多的气体充满空泡内部, 将会到达空泡尾部突破空泡, 沿壁面溢出, 在航行体表面形成较厚的一层气层, 气体流经气层后, 从航行体尾端泄出. 图4和5分别表示了 $M_1=1.12$ 和 $M_1=11.2$ 时

空泡尾部的流场, 可以看出 $M_1=1.12$ 时空泡的尾部是内凹闭合的, 少有气体溢出; 而在 $M_1=11.2$ 时, 空泡尾部有明显的气体外泄. 在这个阶段的通气空化, 航行体头部的持续空泡仍然有明显的空泡脱落现象, 由于脱落空泡与厚气层融合在一起, 空泡脱落现象变得不明显. 空泡已经无法封闭, 在航行体的表面形成一定厚度的气层, 呈现出向超空泡发展的趋势.

通过以上分析, 随着质量流量之比的增大, 在通气、泄气与空泡脱落相互作用下, 通气空化的主导泄

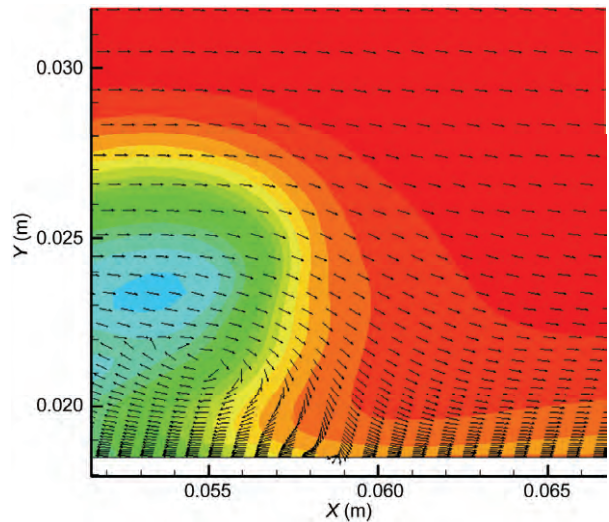


图4 (网络版彩图) $M_1=1.12$ 时空泡尾部组分及速度场

Figure 4 (Color online) Density and velocity field at the closure of the cavity when $M_1=1.12$.

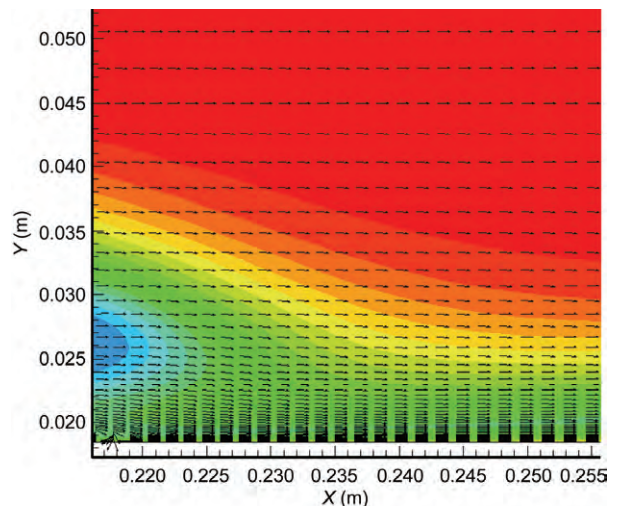


图5 (网络版彩图) $M_1=11.2$ 时空泡尾部组分及速度矢量

Figure 5 (Color online) Density and velocity field at the closure of the cavity when $M_1=11.2$.

气方式发生从空泡泄气到气层泄气的转变. 与之对应, 空泡的脱落也发生从明显的周期性脱落转变为不明显的脱落.

5.1.2 动量流量之比对演化过程的影响

在通入气体质量流量固定的前提下, 我们计算了喷口气体动量流量与来流动量流量之比 M_2 分别为 10.0, 11.4, 12.9, 14.1, 16.1 时通气空化的演化, 如图 5 所示, 各演化云图中时间间隔仍为 2.5 ms. 气体通入空泡后, 带动水蒸气一起运动, 对空泡的生长起到一定的推动作用. 由图 6 可以看出, 随着 M_2 的增大, 航行体肩部的空泡逐渐变长, 这是由于通入空泡的气体动量提高, 以越来越高的速度带动水蒸气向

航行体尾部运动, 对空泡的推动作用增强, 导致空泡长度变长. 在图 6 的算例中, 始终有较为明显的空泡脱落现象, 而没有在航行体表面形成明显的气层, 因此在如上各动量比值下, 通气空化的泄气方式始终以空泡泄气为主. 通气空化的演化过程变化不大, 仍然是在肩部存在持续的空泡, 尾部出现准周期性空泡脱落.

综上所述, 通气的质量流量是影响泄气方式的主要因素, 而通气动量流量对其影响较小.

5.2 通气质量流量与动量流量对压力系数的影响

本文监测了航行体表面 30 个测点的压力值变化. 图 7(a)和(b)分别表示, 在不同质量流量下各测点压

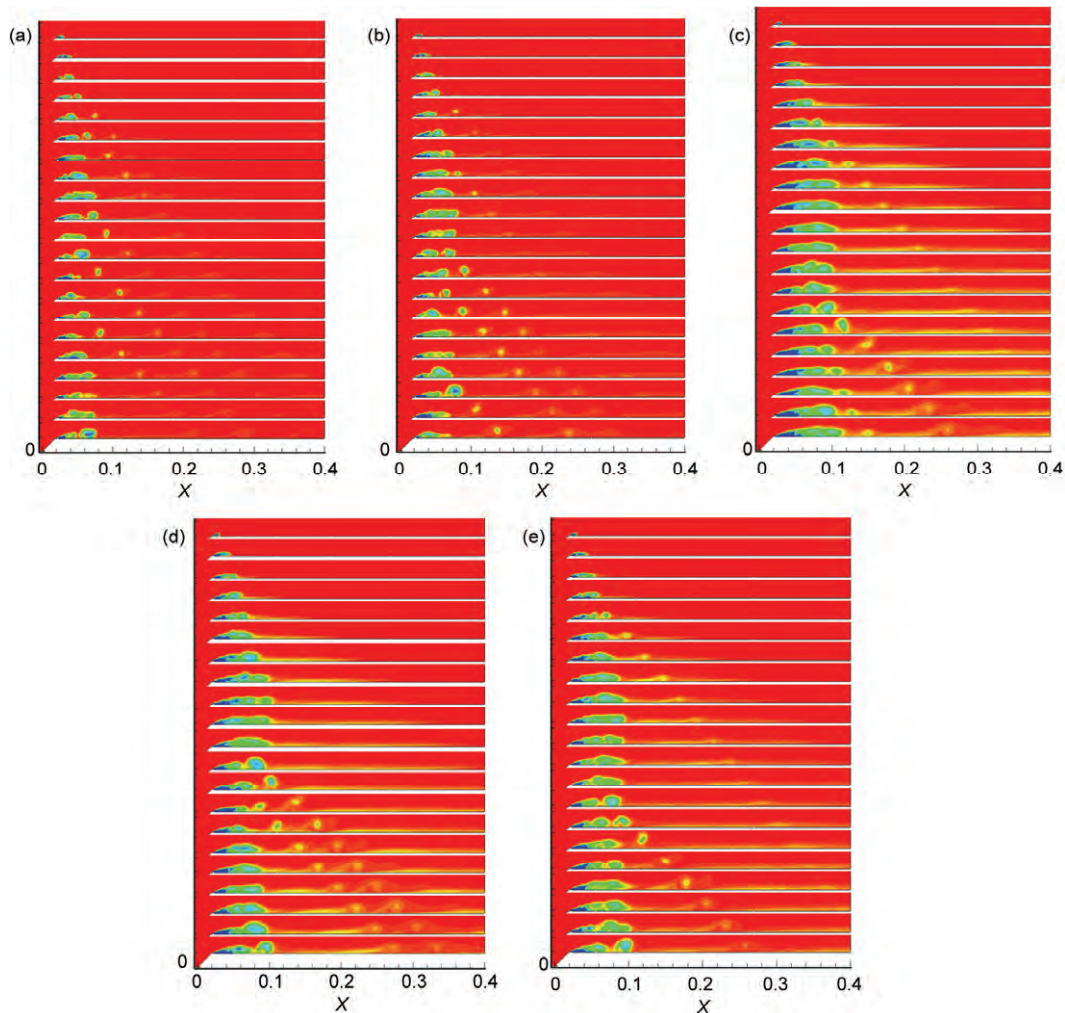


图 6 (网络版彩图)不同 M_2 下通气空化演化云图. (a) $M_2=10.0$, (b) $M_2=11.4$, (c) $M_2=12.9$, (d) $M_2=14.1$ 和(e) $M_2=16.1$

Figure 6 (Color online) Evolution of ventilated cavitation at different M_2 . (a) $M_2=10.0$, (b) $M_2=11.4$, (c) $M_2=12.9$, (d) $M_2=14.1$ and (e) $M_2=16.1$.

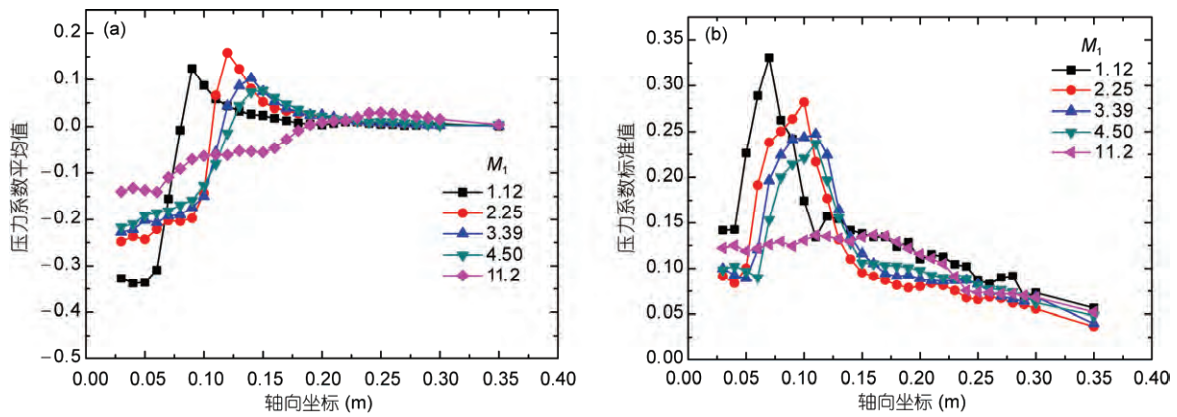


图7 (网络版彩图)不同 M_1 下, 航行体表面测点的压力系数均值(a)和压力系数标准差(b)

Figure 7 (Color online) At different M_1 , the (a) mean of pressure coefficient (b) deviation of pressure coefficient on the vehicle's surface.

力系数的平均值和标准差, 图 8 则表示了不同的 M_1 对回射压力(压力均值的最大值)的影响. 由图 7 和 8 可以看出, 随着通气质量流量的增加, 回射压力呈现降低的趋势, 航行体表面压力的标准差也有所降低并逐渐趋于平稳即航行体表面压力的波动性降低. 这是由于, 随着通气质量流量的增加, 气层泄气方式逐渐占据主导地位, 气体从空泡尾部溢出影响到回射流, 抑制了回射流的强度, 因此使回射压力有所降低.

图 9(a)和(b)分别表示, 在不同动量流量下, 各测点压力系数的平均值和标准差. 从图中看出不同的通气动量流量对压力均值和压力稳定性无明显的影响.

综上, 通气的质量流量对于航行体表面的压力有较大影响, 提高通气质量流量可以削弱回射压力, 增强航行体表面压力的稳定性.

5.3 通气质量流量与动量流量对阻力系数的影响

本文得到了在不同通气质量流量和动量流量下, 航行体的阻力系数和表面压力系数的变化, 对此进行了分析.

图 10(a)和(b)表示了通气动量流量固定时, 航行体阻力均值和标准差随通气质量流量的变化. 可以看出, 随着通气质量流量的提高, 航行体所受到的阻力增加且愈加不稳定.

表 4 表示了 $t=5$ ms, M_1 分别为 4.50 和 11.2 时, 航行体所受到的阻力. 由表 4 可以看出通气质量流量增大时, 航行体的摩擦阻力略有降低而压差阻力增幅较大. 这是由于, 通气质量的提高, 一方面使航行体表面气层覆盖率增加, 而空气的黏性远小于液态

水黏性, 因此航行体到的黏性阻力降低; 另一方面, 在动量流量不变的前提下, 气体质量流量的增加导致气体速度有所降低, 使航行体表面气层厚度增加, 相当于航行体的截面积增大, 导致压差阻力的增加, 整体阻力增大.

图 11(a)和(b)则表示了通气质量流量固定时, 阻力均值随着通气动量流量的变化. 由图 9 可以看出随着通气动量流量的提高, 阻力均值降低, 阻力标准差也呈现减小的趋势. 综上, 通气质量流量的提高增大了航行体的阻力而动量流量的提高可以在一定程度上降低航行体的阻力. 两者的标准差变化程度与均值接近, 阻稳定性均变化不大.

通过以上的计算和分析, 我们看到通气的质量流量和动量流量对通气空化产生不同的影响. 在实际工程中应综合考虑两者的影响作用.

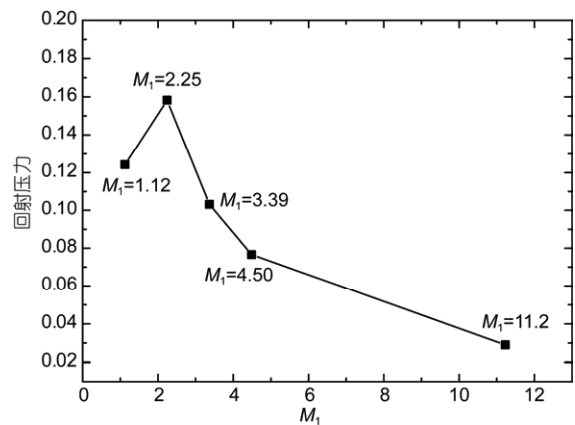


图8 (网络版彩图) M_1 对回射压力的影响

Figure 8 (Color online) The influence of M_1 on the pressure at the closure of cavity.

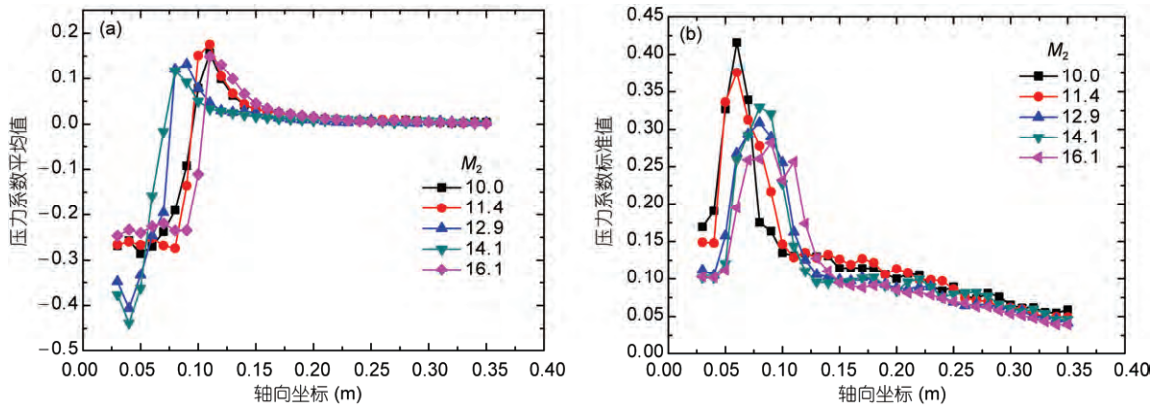


图9 (网络版彩图)不同 M_2 下, 航行体表面测点的压力系数均值(a)和压力系数标准差(b)
 Figure 9 (Color online) At different M_2 , the (a) mean of pressure coefficient, (b) deviation of pressure coefficient on the vehicle's surface.

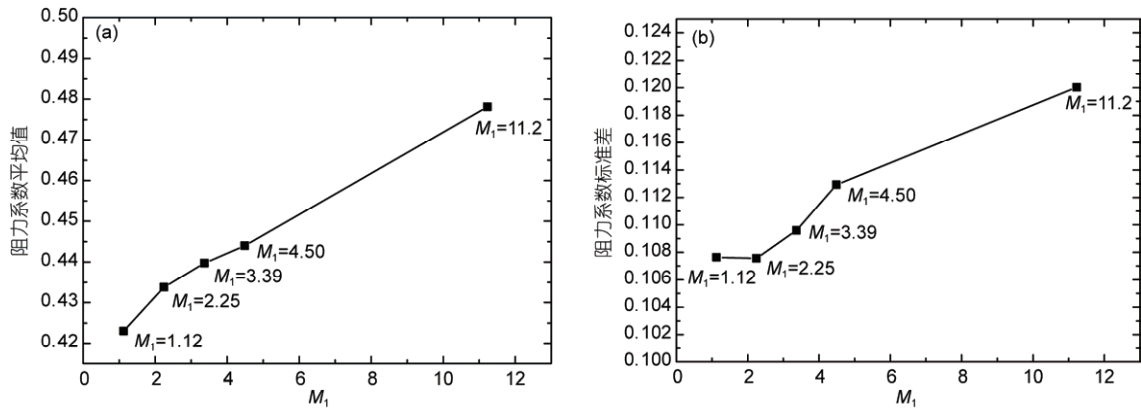


图10 (网络版彩图)不同 M_1 下, 航行体的阻力均值(a)和阻力标准差(b)
 Figure 10 (Color online) At different M_1 , (a) mean of drag coefficient, (b) deviation of drag coefficient of the vehicle.

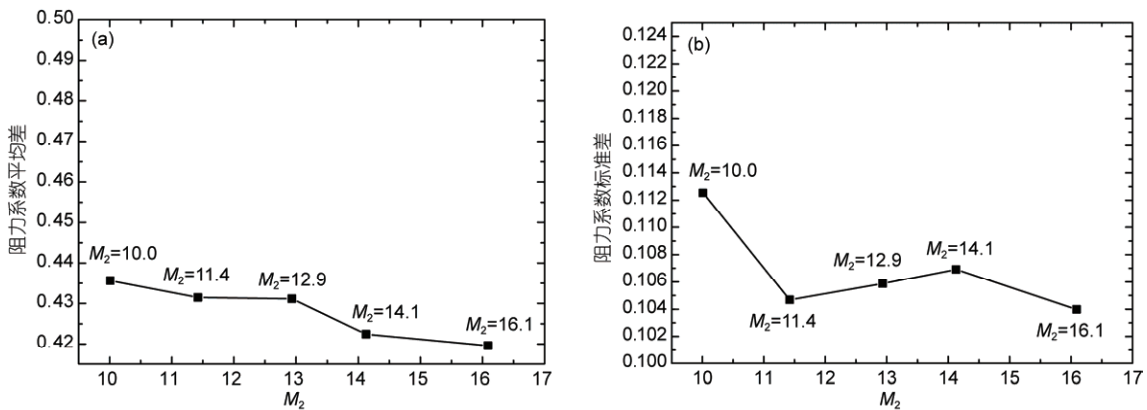


图11 不同 M_2 下, 航行体的阻力均值(a)和阻力标准差(b)
 Figure 11 At different M_2 , (a) mean of drag coefficient, (b) deviation of drag coefficient of the vehicle.

6 小结

本文对通气空化中, 通气的质量流量和动量流量对空化过程的影响进行了数值模拟, 研究了两者

对空化演化的影响, 初步分析了两者对阻力系数和压力系数的影响.

在通气空化的演化过程中, 空泡脱落、通气与泄

表4 $t=5$ ms, $M_1=4.50$ 和 $M_1=11.2$ 下航行体的阻力
 Table 4 Drag of the vehicle at $M_1=4.50$ and $M_1=11.2$ when $t=5$ ms

M_1	黏性阻力系数	压差阻力系数	总阻力系数
4.50	0.14	0.45	0.59
11.2	0.13	0.58	0.71

气三者是相互影响的. 通气质量流量变化对空化的演化影响较大. 通气动量固定时, 随着通气流量的增大, 空泡的脱落也发生从明显的周期性脱落转变为不明显的脱落; 泄气方式也发生转变, 从空泡泄气到最后以气层泄气为主. 当通气质量流量达到一定成

程度时空化有向超空化发展的趋势. 通气动量流量的增大可以提高空泡的长度等, 但是对空泡的脱落和泄气方式则影响较小.

通气质量流量的提高会导致阻力的增大, 但会削弱回射压力. 动量流量的提高会减小阻力, 对航行体表面压力影响较小. 同时两者对于阻力的稳定性影响皆不大.

对于通气的质量流量和动量流量对航行体动力学行为的影响, 深入的机理和规律还有待于进一步的研究和分析.

参考文献

- 1 Ceccio S L. Friction drag reduction of external flows with bubble and gas-injection. *Annu Rev Fluid Mech*, 2010, 42: 183–203
- 2 Kozlov I I, Prokof'ev V V. Gas entrainment from a ventilated cavity with a negative cavitation number. *Fluid Dyn*, 2001, 36: 751–763
- 3 Wang Y W, Huang C G, Du T Z, et al. Shedding phenomenon of ventilated partial cavitation around an underwater projectile. *Chin Phys Lett*, 2012, 29: 014601
- 4 Matveev K I, Buenett T J, Ockfen A E. Study of air-ventilated cavity under model hull on water surface. *Ocean Eng*, 2009, 36: 930–940
- 5 Ji B, Luo X W, Zhang Y, et al. A three-component model suitable for natural and ventilated cavitation. *Chin Phys Lett*, 27: 096401
- 6 Ji B, Luo X W, Peng X X, et al. Numerical investigation of the ventilated cavitating flow around an under-water vehicle based on a three-component cavitation model. *J Hydrodyn Ser B*, 2010, 22: 753–759
- 7 Gu W, He Y S. Flow control on unstable cavitation phenomena. *Acta Mech Sin*, 2011, 33: 19–27 [顾巍, 何友声. 空泡流非稳态现象的流动控制. *力学学报*, 2001, 33: 19–27]
- 8 Wang H B, Wang C, Wei Y J, et al. Experimental investigation of ventilated supercavity on symmetrical underwater bodies. *Eng Mech*, 2007, 24: 166–171 [王海斌, 王聪, 魏英杰, 等. 轴对称航行体通气超空泡的特性实验研究. *工程力学*, 2007, 24: 166–171]
- 9 Zhang G, Yu K P, Zhou J J. Three dimensional numerical simulation on the cravity effect of ventilated cavity. *Eng Mech*, 2012, 28: 366–384 [张广, 于开平, 周景平. 通气空泡重力效应三维数值仿真研究. *工程力学*, 2012, 28: 366–384]
- 10 Jiang Z H, Yu K P, Zhang J Z, et al. Experimental research on shape and drag characteristics of ventilated supercavity on underwater boodies. *Eng Mech*, 2007, 24: 152–158 [蒋增辉, 于开平, 张嘉钟, 等. 水下航行体通气超空泡形态及阻力特性试验研究. *工程力学*, 2007, 24: 152–158]
- 11 Semenenko V N. Artificial Supercavitation. *Physics and Calculation*. Kiev: Ukrainian Academy of Sciences Kiev Institute of Hydrodynamics, 2001. 205–237
- 12 Amromin E. Microbubble drag reduction downstream of ventilated partial cavity. *J Fluids Eng-Trans ASME*, 2010, 132: 051302
- 13 Yu X X, Wang Y W, Huang C G, et al. Unsteady characteristics of ventilated cloud cavity around symmetrical bodies. *J Ship Mech*, 2014, 5: 499–506 [于嫻嫻, 王一伟, 黄晨光, 等. 轴对称航行体通气云状空化非定常特征研究. *船舶力学*, 2014, 5: 499–506]
- 14 Singhal A K, Athavale M M, Li H Y, et al. Mathematical basis and validation of the full cavitation model. *J Fluids Eng-Trans ASME*, 2002, 124: 617–624
- 15 Dular M, Bachert R, Stoffel B, et al. Experimental evaluation of numerical simulation of cavitating flow around hydrofoil. *Eur J Mech B-Fluids*, 2005, 24: 522–538
- 16 Reboud J L, Stutz B, Coutier O. Two-phase flow structure of cavitation: Experiment and modeling of unsteady effect. In: *Proceedings of the Third International Symposium on Cavitation, Grenoble, 1998*
- 17 Reboud J L, Stutz B, Coutier O. Two phase flow structure of cavitation: Experiment and modeling of unsteady effects. In: *Third International Symposium on Cavitation, Grenoble, France, 1998*
- 18 Huang B, Wang G Y, Quan X B, et al. Study on the unsteady cavitating flow dynamic characteristics around a 0-caliber ogive revolution body. *J Exp Fluid Mech*, 2011, 25: 22–28 [黄彪, 王国玉, 权晓波, 等. 绕平头回转体非常空化流体动力特性研究. *实验流体力学*, 2011, 25: 22–28]

Parameters and influence of gas injection on modification of cavitation stability

YU XianXian, WANG YiWei*, HUANG ChenGuang & DU TeZhan

*Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

Cavitation occurs around high-speed underwater vehicles, which induces shedding and collapse of bubbles with noises, vibration, etc. Gas-injection is an important method to adjust the instability of cavitating flow field. In this paper, dimensionless quantities are got through the dimensional analysis on ventilated cavitation. Among these dimensionless quantities, the ratios of mass flux and momentum flux of the gas-injection to those of the main flow are crucial in ventilated cloud cavitation. Numerical simulation is carried out on these two dimensionless quantities. The results indicate that gas-injection mass flux has greater impact on the evolution of ventilated cavitation than momentum flux. As gas-injection mass flux increases, the form of gas entrainment changes from bubbles to air-layer. Besides, increase of gas-injection mass flux can reduce the high pressure at the closure of the cavity and improve the pressure stability while it can also lead to the rise of drag of the vehicle. Gas-injection momentum flux has little effect on the evolution and pressure. Increase of gas-injection momentum flux can reduce drag of the vehicle.

ventilated cloud cavitation, instability, numerical simulation, mass flux, momentum flux

PACS: 47.10.ad, 47.11.Df, 47.55.dp, 47.85.lb

doi: 10.1360/SSPMA2014-00334