

通气空泡最小空化数影响因素数值研究

张 广, 于开平, 邹 望, 李振旺

(哈尔滨工业大学 航天学院, 150001 哈尔滨)

摘 要: 为了揭示重力效应及水洞阻塞效应对最小通气空化数的影响, 本文基于两流体多相流模型和 SST (Shear Stress Transport) 湍流模型, 考虑了水气两相间的相互作用, 建立了通气空泡流三维数值仿真模型. 对比研究了无界流场和水洞流场中最小通气空化数与其影响因素之间的关系. 研究表明无界流场中的最小通气空化数随弗劳德数的增加而减小, 两者呈幂函数关系; 在水洞中, 相同的弗劳德数条件下最小空化数随着阻塞比的增加而增加. 在相同的弗劳德数区内, 最小空化数的变化幅度随阻塞比的增加而减小.

关键词: 通气空泡; 最小空化数; 重力效应; 阻塞比

中图分类号: O351.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)05-0013-05

Numerical research on influencing factors of ventilated cavity minimum cavitation number

ZHANG Guang, YU Kaiping, ZOU wang, LI Zhenwang

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: In order to reveal the influence of gravity effect and tunnel blocking effect on the minimum ventilation cavitation number. In this paper, based on the two-fluid multiphase flow and SST (Shear Stress Transport) turbulence models considering gas-water interaction, the three-dimensional ventilated cavity simulation model is established. The relations between minimum ventilation cavitation number and its influencing factors are analyzed respectively in unbounded flow field and water tunnel. The simulations show that minimum cavitation number decreases with the increase of Froude number in unbounded flow field in the form of a power function. In water tunnel the minimum cavitation number increases with the blockage ratio at the same Froude number. The change range of minimum cavitation number decreases with the increase of the blockage ratio at the same Froude number range.

Key words: ventilated cavity; minimum cavitation number; gravity effect; blockage ratio

借助人工通气生成超空泡的方法由 H. Reichardt^[1]首次提出, 通过这种方法可在低速条件下生成通气超空泡. 由于通气空泡具有易于实现和控制等特点, 近些年来在超空泡流动实验研究中被广泛采用. 从通气空泡水洞实验研究中发现, 通过不断增加通入空泡内的气体量, 并不能无限制的获得更大尺度的通气空泡, 也就是

通气空化数存在极限值^[2-3]. 通气空化数与通气率之间呈典型的 L 形曲线关系, 如图 1 所示^[4]. 文献[5]作者通过实验观测指出最小通气空化数出现的原因是重力效应和阻塞效应影响的结果. 重力对最小空化数的影响表现为导致通气空泡尾流从回注射流转变为双涡管模式, 转变后的通气空化数随通气量的增加变化很小; 阻塞效应的影响是由于水洞壁面限制致使流场局部流速增大, 在低空化数条件下流动可能被阻塞, 通过增加通气量同样无法得到更低的空化数. 在空泡流动的早期, Brennen^[6]忽略重力效应, 基于势流理论对水洞阻塞效应对空化数影响进行了数值研究, 确

收稿日期: 2012-06-08.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(10832007).

作者简介: 张 广(1983—), 男, 博士研究生;

于开平(1968—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 于开平, Yukp@hit.edu.cn.

定了不同阻塞比条件下所能达到的最小空化数. E Kawakami^[7] 通过水洞实验在一定程度上验证了 Brennen 结论的有效性. 但是由于通气空泡流动本身的复杂性和实验条件的制约, 通过实验很难准确的得到最小空化数与其影响因素之间规律性关系.

因此本文在文献[8-10]对通气空泡流动数值研究成果的基础上, 利用计算流体动力学(CFD)软件 CFX, 建立用于模拟通气空泡的多相流数值计算模型, 充分考虑重力效应和阻塞效应对空泡流动的影响, 分别针对无界流场和水洞流场进行大量的仿真计算, 以求进一步的揭示通气空泡最小空化数与其影响因素之间的规律.

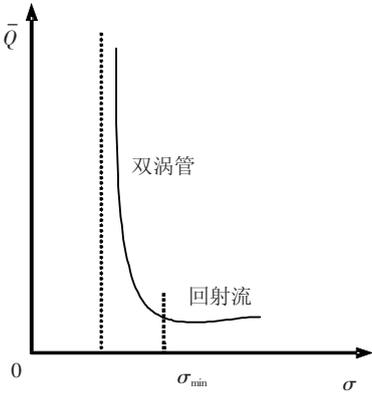


图 1 典型的通气率与通气空化数关系曲线

1 数值计算模型

1.1 控制方程

由于本文研究通气空泡流问题, 只涉及气液两项之间的相互作用. 控制方程为气相和液相连续性方程、动量方程、体积分数方程以及湍流方程.

连续性方程

$$\frac{\partial(\gamma_{\alpha}\rho_{\alpha})}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma_{\alpha}\rho_{\alpha}U_{\alpha}) = 0, \quad \alpha = 1, 2.$$

动量方程

$$\frac{\partial(\gamma_{\alpha}\rho_{\alpha}U_{\alpha})}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma_{\alpha}(\rho_{\alpha}U_{\alpha} \otimes U_{\alpha})) = -\gamma_{\alpha}\nabla p_{\alpha} + \nabla \cdot (\gamma_{\alpha}\mu_{\alpha}(\nabla U_{\alpha} + (\nabla U_{\alpha})^T)) + S_M + M_{\alpha}, \quad \alpha = 1, 2.$$

式中: $S_M = \rho g$ 为重力源项, M_{α} 是由于其它相作用于相 α 的界面张力. 体积分数方程

$$\sum_{\alpha=1}^2 \gamma_{\alpha} = 1.$$

湍流方程

基于 Baseline (BSL) $k - \omega$ 模型的 SST 湍流模

型解决了湍流剪切应力的传输问题, 同时又对逆压梯度下产生的分离流具有较高精度的预测, 文献[8]通过几种湍流模型的对比, 证明 SST 湍流模型对通气超空泡流的数值模拟具有较高的精度.

基本方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ &P_k - \beta' \rho k \omega, \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \\ &D_{\omega} + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2. \end{aligned}$$

式中: k 为湍动能, ω 为湍动频率, μ_t 为湍动粘度, U 为速度矢量, P_k 为湍流产生项.

$$\begin{cases} \mu_t = \frac{\alpha_1 k \rho}{\max(\alpha_1 \omega, S F_2)}, \\ F_2 = \tanh \left(\left(\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right)^2 \right), \\ D_{\omega} = 2\rho(1 - F_1) \frac{1}{\sigma_{\omega} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \\ F_1 = \tanh \left(\min \left(\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{CD_{k\omega} \sigma_{\omega} y^2} \right) \right)^4, \\ CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega} \omega} \nabla k \nabla \omega, 10^{-10} \right). \end{cases}$$

SST 模型综合了近壁面 $k - \omega$ 模型的稳定性和边界层外部 $k - \varepsilon$ 模型独立性优点, 方程中的系数是两种模型相应系数的线性组合, 以 α_1 表示 $k - \omega$ 模型系数, α_2 表示 $k - \varepsilon$ 模型系数则 SST 模型系数为

$$\alpha = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 (1 - F_2).$$

2 网格划分及边界条件设置

数值模拟采用直径 $D_n = 10 \text{ mm}$ 的圆盘空化器模型, 整个计算域均采用六面体结构化网格离散, 如图 2 所示. 计算域的进口和出口分别定义为速度进口和压力出口, 通气孔采用质量流率入口条件. 针对无界流域和有界流域问题外边界分别采用开口条件和无滑移壁面条件, 如图 3 所示. 在开始大量计算之前, 考察了网格数量对计算精度的影响. 本文分别采用 533 820、1 026 000、1 543 500 三种网格数量进行对比计算, 以空泡内平均压力作为评价参数. 结果发现两种数量较大的网格计算结果偏差小于 2%, 而数量较小的网格计算结果偏差相对偏大, 综合考虑计算成本及精度本文选用了 1 026 000 数量的网格进行后续计算.

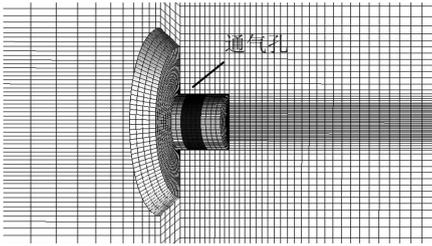


图2 仿真模型及网格

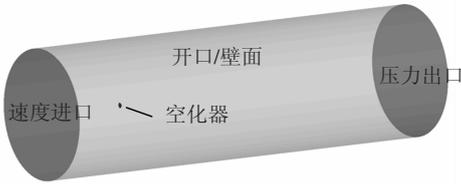


图3 计算域及边界条件

文中涉及的通气空化数及弗劳得数分别定义如下

$$\sigma_c = \frac{2(p_\infty - p_c)}{\rho V_\infty^2}, \quad Fr = \frac{V_\infty}{\sqrt{gD_n}}$$

式中: p_∞ 为无扰动来流压强, p_c 为空泡内部压强, V_∞ 为无扰动来流速度, D_n 为空化器直径。

3 计算结果与分析

3.1 无界流场中最小通气空化数的变化规律

重力对通气空泡影响主要表现是空泡轴线的上漂变形和通气空泡尾部泄气方式的转变,空泡泄气方式的转变是影响空泡尺度及空化数的重要因素。本文首先对圆盘空化器在无界流场中所生成的通气空泡进行数值仿真,仿真初始条件为:流场环境压力 $P_\infty = 151.9875$ kPa,环境水温 25°C 。通过调节通气流量得到相应流动条件下以双涡管模式闭合的通气空泡,该通气率条件下通气空泡尺度达到最大值,相应的通气空化数达到最小值,流场的弗劳德数是通过改变来流速度进行调节。表1给出不同弗劳德数条件下,数值仿真获得的以双涡管尾流模式闭合的稳定空泡。

表1 不同弗劳德数条件下的最大空泡形态

Fr	空泡形态
7.98	
9.58	
12.77	
15.96	
20.75	

由表1可见,在不同的弗劳德数条件下能够获得的最大通气空泡尺度差异很大。当弗劳德数较小时通气空泡尾流很容易发生转变致使空泡尺度不能进一步增大,随着弗劳德数的增加(重力效应减弱)空泡尾流发生转变时能够得到更大尺度的通气空泡,也就是说达到更小的通气空化数。通过后处理得到通气空泡内部的平均压力,在进一步通过空化数定义式求得相应条件下的最小空化数。不同弗劳德数条件下计算得到的最小空化数数据如图4,通过对图4中的数据点进行最小二乘拟合,得到了无界流场中最小通气空化数与弗劳德数的关系如下

$$\sigma_{\min} = 0.7319Fr^{-0.9521}$$

可见,在无界流场中最小空化数与弗劳德数呈典型的幂函数关系。

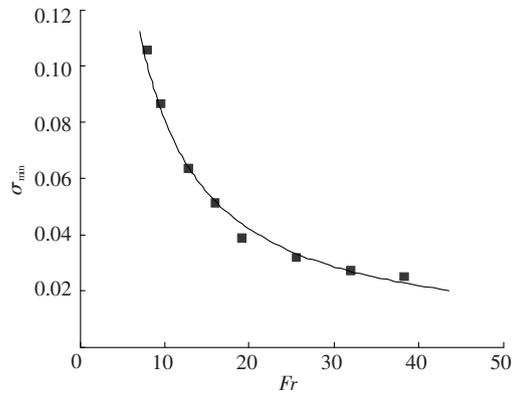


图4 不同弗劳德数条件下的最小空化数

3.2 水洞流场中最小通气空化数的变化规律

通气空泡流动的实验研究大多是在水洞中进行的,除重力效应以外,水洞流场中不可避免的阻塞效应也是影响通气空泡流动的重要因素。下面通过改变计算域外边界半径和来流速度来研究不同阻塞比、不同弗劳德数条件下通气空泡的形态特征,分析水洞流场中最小通气空化数的变化规律。在这里水洞阻塞比定义为

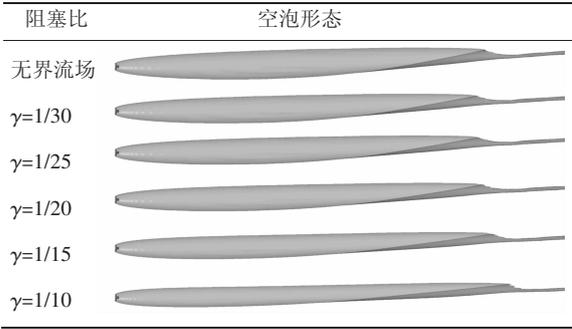
$$\gamma = \frac{D_m}{D_1}$$

式中: D_m 表示模型最大截面直径, D_1 表示水洞截面直径。

表2给出当弗劳德数 $Fr = 15.96$ 时,不同阻塞比条件下获得的最大尺度通气空泡形态。可以明显发现,在无界流场中空泡形态较为“饱满”基本呈现细长椭球体外形,而在水洞流场中随着水洞阻塞比的增加空泡在径向收缩明显,空泡上表面逐渐趋于平直,空泡长细比增大。表3给出了5种阻塞比,8种弗劳德数条件下得到的最小空化

数仿真数据.

表 2 不同阻塞比条件下的最大空泡形态



从表 3 可以看到,在相同弗劳德数条件下,由于阻塞效应的影响水洞中能够获得的最小空化数明显变大,最小通气空化数随着阻塞比的增加而逐渐增加. 导致以上结果的原因可以从不同阻塞比条件下流场压力的分布特征来说明,图 5 给出弗劳德数 $Fr = 15.96$,不同阻塞比条件下水洞流场中线处的压力分布情况,可以看到在相同流动条件下,受阻塞效应的影响空化器上游流场压力变大,阻塞比越大相应位置的压力变化越明显;空化器下游空泡内部压力略微变小,由空化数的定义式可知这种压力变化将导致通气空化数增大.

表 3 不同阻塞比及弗劳德数条件下最小空化数仿真数据

阻塞比	Fr							
	7.98	9.58	12.77	15.96	20.75	25.54	31.93	38.31
无界	0.105 6	0.086 5	0.063 7	0.051 3	0.038 7	0.031 8	0.027 3	0.024 5
1/30	0.118 7	0.103 6	0.087 1	0.077 4	0.072 0	0.069 7	0.068 3	0.067 7
1/25	0.125 5	0.111 7	0.095 0	0.088 7	0.084 5	0.081 6	0.080 6	0.080 4
γ 1/20	0.138 0	0.125 5	0.114 0	0.108 4	0.104 9	0.103 4	0.102 0	0.101 5
1/15	0.165 6	0.156 5	0.148 2	0.145 2	0.142 5	0.141 1	0.139 4	0.138 5
1/10	0.232 7	0.227 2	0.223 5	0.220 3	0.217 4	0.214 9	0.213 1	0.212 0

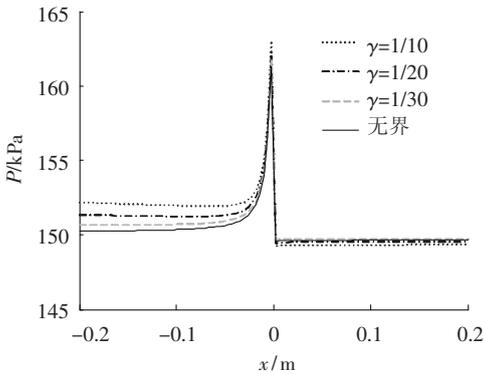


图 5 流场中轴线处的压力分布

图 6 给出不同弗劳德数,不同阻塞比条件下最小空化数的变化情况. 图中仿真数据点从上到下依次为在阻塞比 $\gamma = 1/10, \gamma = 1/15, \gamma = 1/20, \gamma = 1/25, \gamma = 1/30$ 条件下得到. 虚线表示文献[5]中忽略重力效应给出的不同阻塞比条件下的阻塞空化数,在这里阻塞空化数定义为一定阻塞比条件下所能达到的最小通气空化数. 由图 6 可见在相同的弗劳德数变化范围内,随着阻塞比的增加最小空化数变化幅度相对减小. 在一定的阻塞比条件下,随着弗劳德数的增加最小通气空化数逐渐减小并趋于相同流动条件下的阻塞空化数. 图 7 中给出通过计算得到的不同阻塞条件下的阻塞空化数与文献[5]中最小空化数势流解的对比关系. 可以看到两者数值基本吻合,所不同的

是本文数值模型充分考虑了流体的粘性对空泡发展及尾部流动的影响,在小阻塞比条件下本文的预测值偏小.

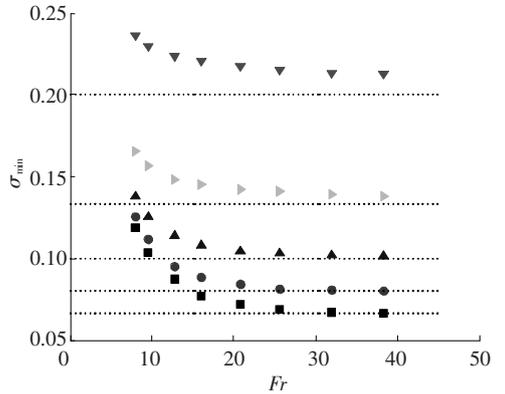


图 6 不同弗劳德数及阻塞比条件下的最小空化数

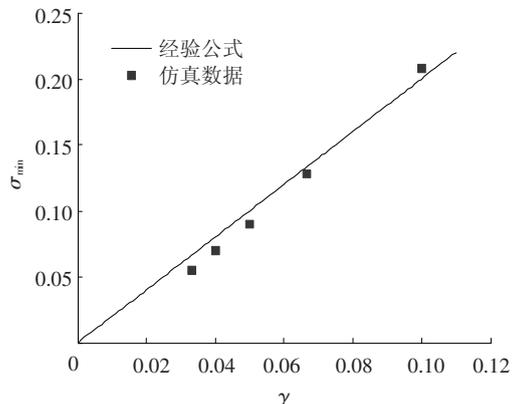


图 7 仿真结果与经验公式对比关系

5 结 论

本文通过数值计算对比分析了无界流场和水洞流场中的通气空泡流动,研究了重力效应、阻塞效应对通气空泡最小空化数的影响,得到的主要结论如下:

1) 重力是影响通气空泡最小空化数的主要因素,无界流场中最小通气空化数随弗劳德数的增加而减小,两者呈幂函数关系.

2) 相对于无界流场,在相同弗劳德数条件下,水洞中得到的最小空化数明显变大,而且随着阻塞比的增加而增加;相同弗劳德数变化范围内,最小空化数变化幅度随着阻塞比的增加而减小.一定的阻塞比条件下,最小空化数随着弗劳德数的增加而减小并趋同于相同流动条件下的阻塞空化数.

参考文献

- [1] REICHARDT H. The laws of cavitation bubbles as axially symmetrical bodies in a flow [R]. Great Britain: Ministry of Aircraft Production Reports and Translations, 1946.
- [2] 王海滨,王 聪,魏英杰,等. 轴对称航行体通气超空泡的特性实验研究[J]. 工程力学, 2007, 24(2): 166 - 171.
- [3] 陈鑫. 通气空泡流研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006: 116 - 120.
- [4] WOSNIK M, SCHAUER T J, ARNDT E A. Experimental study of a ventilated supercavitating vehicle [C]//Fifth International Symposium on Cavitation. Osaka, Japan:[s. n.], 2003: 1 - 7.
- [5] SCHAUER T. An experimental study of a ventilated supercavity vehicle [D]. Minneapolis: University of Minnesota, 2003.
- [6] BRENNEN. A numerical solution of axisymmetric cavity flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1969, 37(4): 671 - 688.
- [7] KAWAKAMI E E, ARNDT R E A. Investigation of the behavior of ventilated supercavities [J]. Journal of Fluids Engineering, 2011, 133(8): 1 - 11.
- [8] 周景军,于开平,杨 明. 低弗鲁德数条件下通气超空泡泄气机理数值模拟[J]. 工程力学, 2011, 28(1): 251 - 256.
- [9] 杨明,于开平,周景军,等. 通气超空泡洞壁影响及其比尺效应数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(7): 23 - 27.
- [10] ZHOU Jingjun, YU Kaiping, MIN Jingxin, *et al.* The comparative study on ventilated super cavity shape in water tunnel and infinite flow field [J]. Journal of Hydrodynamics. SerB, 2010, 22(5): 689 - 696.

(编辑 苗秀芝)