超空化发展初始阶段通气空化非定常流动特性研究

段 磊1,王恵军1,黄春蓉2,何春涛1

(1. 北京机械设备研究所; 2. 中国人民解放军驻航天科工集团第二研究院二〇六所军代室,北京 100854)

摘 要 为了进一步了解通气超空化发展初始阶段的流动特性,采用实验与数值计算的方法对绕锥头 回转体通气超空化发展初始阶段的流场结构进行研究。结果表明:反向射流使附着在回转体肩部的透明空 泡破灭,在反向射流与通气气体共同作用下,附着空泡内部形成一个大尺度旋涡结构,此旋涡结构与主流相 互作用逐渐分裂成多个小尺度的旋涡结构,最终形成脱落空化涡。

关键词 多相流体力学;通气超空化;反向射流;速度旋涡;脱落空化涡

中图分类号 TV131. 32 文献标识码 A

Research on Nonsteady Flow Characteristics of Ventilated Supercavitation in Initial Development Stage

DUAN Lei¹, WANG Huijun¹, HUANG Chunrong², HE Chuntao¹

(1. Beijing Mechanical Equipment Institute; 2. The Military Representative Office

of PLA in No. 206 Institute of 2^{ed} Academy of CASIC, Beijing 100854, China)

Abstract To understand the flow characteristics of ventilated supercavitation in the initial development stage, the flow filed structure of ventilated supercavitation around axisymmetric body in the initial development stage is researched by the experimental and numerical calculation methods. The results show that the backward jet make the transparent cavitation attached to axisymmetric body's shoulder busted. A large scale vortex structure in the ventilated cavitation is formed by the interaction between backward jet and cavity air, and the vortex structure and mainstream experience interactions and split into some small scale vortexes. In the end, the shedding bubble vortex is formed.

Key words multiphase hydromechanics; ventilated supercavitation; backward jet; velocity vortex; shedding bubble vortex

0 引言

近年来,随着超空泡现象被证明可以大幅减小 水下航行体的航行阻力,使超空泡航行体获取超高 速性能,成为各海军强国的研究热点^[1]。文献 [2-3]指出有2种方法可以达到超空化:第1种方 法是自然超空化,通过提高航行体的速度或者降低 环境压力2种途径可以实现,但在开放水域里环境 压力不能轻易改变,以现有的科技水平航行体速度 也较难提高;第2种方法是通气超空化,即通过通 人不可凝结气体的方法形成超空化,相比第1种方 法,此方法更容易实现,被认为是实现超空泡减阻 的主要方法。潜射导弹在水下发射过程中由于速 度和头型(锥头回转体)的关系,容易产生自然空 化,自然空化的空泡压力较低,在出水过程中空泡 溃灭产生较大的溃灭压力,对弹体产生较大的载荷 而导致发射失败,采用通气空化的方式可以提高空 泡区域压力,形成超空化完全包裹弹体,在出水过 程中减小溃灭压力,因此研究绕回转体的通气超空 化同样具有工程意义。

收稿日期:2018-11-12

作者简介:段磊(1982-),男,博士,高级工程师,主要从事水下发射及多相流研究。

超空泡发展初始阶段是超空泡形成的不可或 缺的重要阶段,涉及到多相流、湍流、质量输运、可 压缩性和非定常性等复杂的流动机制。为了进一 步研究通气超空化发展初始阶段的流动特性,国内 外学者对通气空泡进行了一系列实验和数值计算 研究。Roger EA Arndt^[46]对绕带圆盘空化器的回 转体进行了大量的通气空化实验,研究超空化形成 的初始阶段的流动特性,观测到了反向射流在空泡 区域的发展,得到不同通气率、不同雷诺数下通气 空化的空泡形态。王一伟^[7]采用实验和数值计算 的手段对锥头回转体通气空化进行了研究,获得了 通气空化空泡的发展过程。把通气空化的发展分 为3个阶段,由于实验条件的局限性没有形成超空 化,所以重点分析了反向射流与从通气孔出流气体 的相互作用。

目前,国内外学者对超空化发展的初始阶段的 研究较少,大部分研究是在给定速度和通气量的情 况下,研究超空化稳定后的流场信息,对超空化从 无到有随时间的变化过程没有深入地研究,但是超 空化发展过程存在明显的时空非定常特性,特别是 超空化形成的初始阶段存在复杂的气液两相漩涡 脱落问题。为了进一步研究超空化形成过程的特 性,掌握超空化形成规律,本文采用数值计算与实 验相结合的方法对绕锥头回转体通气超空化发展 的初始阶段进行研究,重点分析反向射流的发展与 出流气体的相互作用以及空泡的断裂脱落特性。

1 实验设备与数值计算方法

1.1 实验设备与方法

实验在闭式循环空化水洞^[8-9]进行。实验段 截面为矩形:0.19 m×0.07 m,长度为0.7 m。通过 实验段的上下部及前侧面的透明有机玻璃窗观察 通气空泡形态。本系统包括作为光源的镝灯、记录 流场结构的高速摄像机和1台用于实时显示存储 图像的计算机。其中3台镝灯功率皆为1 kW,分 别作为主光源和辅光源。记录流场图像的高速摄 像机是美国柯达公司生产的 HG-LE 型相机。HG-LE 高速摄像机以 CMOS 传感器为记录介质,具有 速度快,耗电量小且图像清晰的特点。其记录速度 最高可达 100 000 帧/s,完全能够满足通气空化流 场研究的需要。为了获得通气超空化空泡的发展 过程,高速摄像机提前开始采集然后在对锥头回转 体进行通气,这样就可以捕捉到通气超空化空泡从 无到有的时空发展历程。

1.2 控制方程与数值计算方法

1.2.1 连续性与动量方程

采用均质平衡流模型,则 Favre 平均的 N-S 方程为

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

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

式中: $\rho_m = \rho_i \alpha_i + \rho_v (1 - \alpha_i)$ 为混合介质的密度, α_i 为液相体积分数;u为混合介质的速度;p为混合介质的压强; μ 和 μ_i 分别为混合介质的层流和湍流粘性系数;下标i和j分别为坐标方向。

1.2.2 FBM 湍流模型

由 Johansen 等提出的滤波器湍流模型中,k方程和 ε 方程采用公式(3)-(4)的形式,如下所示: $\partial(\rho_m \varepsilon) \ \partial(\rho_m u_i \varepsilon)$

$$\frac{\varphi_{m}\varepsilon_{j}}{\partial t} + \frac{\varepsilon(\varphi_{m}u_{j}\varepsilon_{j})}{\partial x_{j}} = C_{\varepsilon_{1}}\frac{\varepsilon}{k}P_{t} - C_{\varepsilon_{2}}\rho_{m}\frac{\varepsilon^{2}}{k} + \frac{\partial}{\partial x_{j}}\left[(\mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\varepsilon}})\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_{j}}\right]$$
(3)

$$\frac{\partial(\rho_m k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_j k)}{\partial x_j} = P - \rho_m \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] (4)$$

$$\mu_t = \frac{C_{\mu}\rho_m \kappa}{\varepsilon} F \tag{5}$$

式中:k、 ε 分别为湍动能和湍流耗散率; P_t 为湍动 能生成项; μ_t 为湍流黏性系数。模型常数分别为: C_{s1} =1.44, C_{s2} =1.92, σ_s =1.3, σ_k =1.0, C_{μ} =0.09; F为滤波函数,F由滤波器尺寸和湍流长度比尺的 比值大小决定,定义为

$$F = \min[1, C_3 \frac{\lambda \varepsilon}{k^{3/2}}], C_3 = 1.0$$
 (6)

在标准 k-e 湍流模型中加入滤波函数后,对尺度小于滤波器尺寸的湍流,采用标准 k-e 模型模

拟;对尺度大于滤波器尺寸的湍流结构,则采用直接计算方法求解。由式可知,当湍流尺度较大时, 湍流黏性系数表达为

$$\mu_t = \rho_m C_\mu C_3 \lambda \sqrt{k} \tag{7}$$

值得注意的是,为了保证滤波过程的实现,所 选取的滤波器尺寸应不小于滤波计算区域的网格 大小,即 $\lambda > \Delta_{grid}$,这里网格大小取为 $\Delta_{grid} = (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z)^{1/3}$, $\Delta x \setminus \Delta y$ 和 Δz 分别为网格在3个坐标方向 的长度。

1.2.3 计算边界条件与设置





Fig. 1 Schematic diagram of boundary condition setting



图 2 网格示意图



图 1 所示为边界条件设置示意图。通过速度 入口的速度设置与实验的来流速度一致,压力出口 的压力与实验的环境压力一致,回转体壁面设为无 滑移壁面条件,通气缝的质量流量与根据实验值保 持一致。如图 2(a)所示,采用包裹回转体的 C 型 网格拓扑结构来更好地控制回转体周围的网格分 布,根据实验结果中通气空化空泡的区域来确定 C 型网格拓扑区域的范围;如图 2(b)所示,为了可以 准确捕捉通气空化区域内的流场信息以及减少整 个计算域的网格数量,包裹回转体 C 型网格拓扑 区域的最小网格尺度在 0.1 mm,其他区域的网格 尺度逐渐增大。

2 结果与分析

2.1 超空化的形成过程

图 3 为绕锥头回转体通气超空化形成过程中 空泡长度随时间的变化规律,以回转体头部位置为 起点、空泡闭合位置为终点确定空泡长度,用 Lc 表 示,回转体的长度用 L 表示。本文根据大量试验 结果和结合文献的研究,根据空泡长度变化规律对 通气超空化发展的各个阶段进行定义,即空泡从持 续增长到出现第一次空泡团脱落为第一阶段,第二 阶段为空泡的断裂增长阶段,第三阶段空泡的长度 在一个范围内波动,趋于稳定状态。这 3 个阶段都 存在空泡团的断裂脱落,而超空化发展的初始阶段 在整个超空化形成过程中起着关键作用,本文对超 空化发展第一阶段的流场结构进行深入分析。



图 3 通气空化空泡长度随时间的变化



2.2 反向射流的发展

为了形象细致地描述反向射流发展过程空泡 区域内的流场信息,如图 4 和图 5 所示,给出了不 同时刻的空泡形态和相应时刻的流场信息,其中图 4(a)、图 5(a)为实验观测的空泡形态;图 4(b)、图 5(b)为数值计算得到的空泡形态,图 4(c)、图 5 (c)为数值计算得到 Q=5 000 的等值面;图 4(d)、 图 5(d)为流线和气体体积分数分布图;图 4(d)、 图 5(d)为流线和气体体积分数分布图;图 4(e)、 图 5(e)为涡量分布云图;图 4(f)、图 5(f)为空泡 前端区域以通气孔起始位置的流线图;图 4(g)、图 5(g)和图 8(g)为空泡前端区域的速度矢量图。 从图 4(g)和图 5(g)可以清晰地看出水相含量较 高的反向射流沿着回转体壁面向空泡前端推进,与 此同时从图 4(f)和图 5(f)中观察到从通气孔出流 的气体并没有阻止反向射流的发展,而是沿着空泡 前端的水气交界面流动,进而可从图 5(f)中观察到 水相含量较高的反向射流发展到空泡前端,水体占 据了原来透明空泡的位置,如图 5(a)和图 5(b)所 示,空泡前端的透明空泡溃灭;图 6 和图 7 为监测 线段上不同时刻轴向速度和水相体积分数曲线,能 够形象地表明水相含量较高的反向射流向空泡前 端的推进;如图 4(f)、图 5(f)所示,在空泡边界区 域形成了一条与空泡边界相似的高涡量聚集带,这 是由于空泡内部的反向射流、从通气孔出流的气体 以及主流相互作用使空泡边界存在较大的剪切速 度;反向射流与从通气孔出流的气体相互作用,在 整个空泡区域内形成一个大尺度的速度旋涡,随着 空泡的增长而不断增大,如图 4(e)和图 5(e)所示。



透明空泡溃灭



(a)实验得到的空泡形态 透明空泡溃灭



(b)数值计算得到的空泡形态



(c)数值计算得到的 Q=5 000 等值面









structures of flow field (t = 22 ms)

图 8 以及图 9 为不同时刻空泡形态和空泡区 域流场信息。从图 8(d)可以观察到,空泡区域内 一个大尺度的速度旋涡分裂成 3 个小尺度的旋涡 结构,如图 9(d)在主流的作用下,靠近空泡尾部的 旋涡结构逐渐减小,与附着空泡区域逐渐脱离,最 终形成脱落空化涡,如图 9(a)、图 9(b)和图 9(c) 所示。

与此同时,从图 8(d)和图 9(d)可以观察到从 通气孔出流的气体不断排开回转体肩部的水体沿 着空化壁面向下游流动,这与 Spurk^{10]}提出的通气 空泡剪切层原理一致,即当通气空泡形成后气体沿 着空泡壁面向下游流动。最终,气体是沿着空泡壁 面最终与附着在回转体的旋涡空泡团融合。





图 10 监测线段轴向速度

Fig. 10 Axial velocity at monitoring line segment



3 结束语

本文采用数值计算与实验相结合的方法对绕 锥头回转体通气超空化发展的初始阶段进行研究, 得到如下结论:

 1)超空化的发展分为三典型阶段,即空泡从 持续增长到出现第一次空泡团脱落为第一阶段;第
二阶段为空泡的断裂增长阶段;第三阶段空泡的长 度在一个范围内波动,趋于稳定状态。

2) 在通气超空化发展初始阶段, 空泡尾部闭 合位置高压与空泡内低压形成逆压梯度, 在逆压梯 度的作用下, 空泡尾流区形成反向射流, 空泡尾流 区的水体在反向射流的作用下沿着回转体壁面向 空泡前端流动。而从通气孔出流的气体沿着水气 交界面向主流方向发展没有阻止反向射流的推进, 以致水相含量较高的反向射流可以推进到空泡前 端, 并使附着在回转体肩部的透明空泡溃灭。

3) 在反向射流与从通气空化出流的气体共同

作用下,附着空泡内部形成一个大尺度旋涡结构, 并且随着空泡的发展而不断增大,此旋涡结构与主 流相互作用逐渐分裂成多个小尺度的旋涡结构,最 终形成脱落空化涡。

参考文献

- [1] 王茂励. 超空泡航行体的数学建模与控制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.
- [2] SEMENENKO V N. Artificial supercavitation physics and calculation [C]// Lecture Notes from the RTO AVT/VKI Special Course on Supercavitating Flows. Belgium: Von Karman Institute for Fluid Dynamics, 2001.
- [3] KAWAKAMI E K, ROGER E A. Investigation of the behavior of ventilated supercavities [J]. Journal of Fluids Engineering, 2011, 133(9):91305.
- [4] WOSNIK M, SCHAUER T. Experimental study on a ventilated supercavitating vehicle[C]// Proceedings of the Fifth International Symposium on Cavitation. Osaka: WorldPress. org, 2003.
- [5] SCHAUER T. An experimental study of a ventilated supercavity vehicle [D]. Minnesota: University of Minnesota, 2003.
- [6] WOSNIK M, SCHAUER T. Measurements in high void-fraction bubbly wakes created by ventilated supercavitation [C]// Proceedings of the Sixth International Symposium on Cavitation. Wageningen: WorldPress. org, 2006.
- [7] WANG Y W. Ventilated partial cavitation shedding caused by the interaction of re-entry jet and air injection [C]// Proceedings of the Eighth International Symposium on Cavitation. Singapore: WorldPress. org, 2012.
- [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):1674-1676.
- [9] 张敏弟,邵峰,付细能,等.绕空化器自然空化与通气空化的对比[J].工程热物理学报,2012,33(7): 1148-1150.
- [10] SPURK J H. On the gas loss from ventilated supercavities[J]. Acta Mechanica,2002,155(3):125-135. (责任编辑:肖楚楚)