

文章编号: 1007-7294(2024)04-0626-11

绕回转体空泡稳定性及流动控制 研究与进展综述

孔德才^{1,2}, 魏海鹏¹, 李杰^{3,4}, 王占莹¹, 尤天庆¹, 王凡瑜¹

(1. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076; 2. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081; 3. 上海交通大学
船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 4. 水动力学教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 回转体水下带攻角高速运动时, 诱发附着在物面的大尺度非对称云状空泡流动, 空泡末端云状局部空泡界面失稳诱发高量值脉动压力对回转体结构强度产生重要影响, 是工程研制面临的重要基础性难题。本文对绕回转体非对称云状空泡流相关研究情况进行梳理, 详细地介绍在非对称云状空泡流实验和数值模拟方法、非对称云状空泡流场结构与界面稳定性、流动调控机制等方面的研究情况, 并分析未来发展趋势, 给出后续需要重点关注的研究方向的建议。

关键词: 回转体; 非对称云状空泡; 非定常; 稳定机制; 流动控制

中图分类号: O352 TV131.32 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.04.013

Review on the research of asymmetric cloud cavitation stability and flow control around revolution bodies

KONG De-cai^{1,2}, WEI Hai-peng¹, LI Jie^{3,4}, WANG Zhan-ying¹, YOU Tian-qing¹, WANG Fan-yu¹

(1. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China; 2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. MOE Key Laboratory of Hydrodynamics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Movement of a revolution body at high speed with an angle of attack induces a large-scale asymmetric cloud cavitation flow attached to the surface of the revolution body. The large pressure induced by the interface instability at the end of the cloud cavitation has an important impact on the performance of the revolution body, which is an important basic theory problem in the development of revolution bodies. This paper combs the relevant research on asymmetric cloud cavitation flow of revolution bodies, introduces the experiment and numerical simulation method research on asymmetric cloud cavitation flow mechanism of flow control, and flow field structure and interface stability of the asymmetric cloud cavitation, analyzes the future development trend, and offers some suggestions of the main research directions in future.

Key words: revolution body; asymmetric cloud cavitation; unsteady; stability mechanism; flow control

0 引 言

回转体在水下高速运动时诱发附着在其物面的复杂空泡流动现象, 空泡的产生与回转体头型、运

收稿日期: 2023-10-13

基金项目: 国防基础科研计划项目(JCKY2021203B003)

作者简介: 孔德才(1983-), 男, 研究员, E-mail: bigblue_bit@msn.com。

动速度、环境压力等因素密切相关。一般用空化数 σ 来描述空化现象,其常见的表达形式为

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{0.5\rho u_\infty^2} \tag{1}$$

式中, p_∞ 为流场的环境压力, p_v 为水的饱和蒸汽压力, ρ 为水的密度, u_∞ 为回转体水下运动速度。在一定的头型外形条件下,空化数越小,越容易发生空化现象,钝锥头型下的典型空泡流现象见图1。

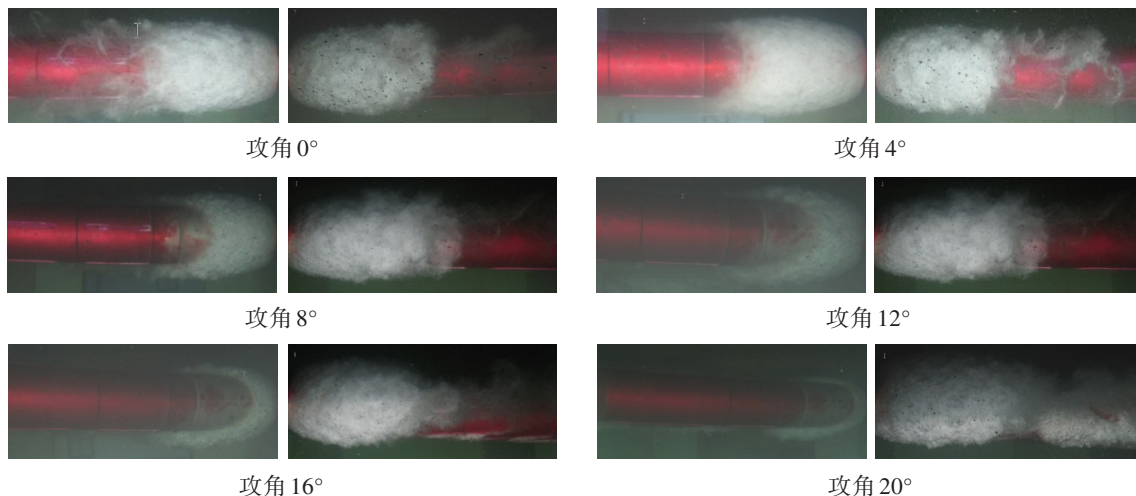
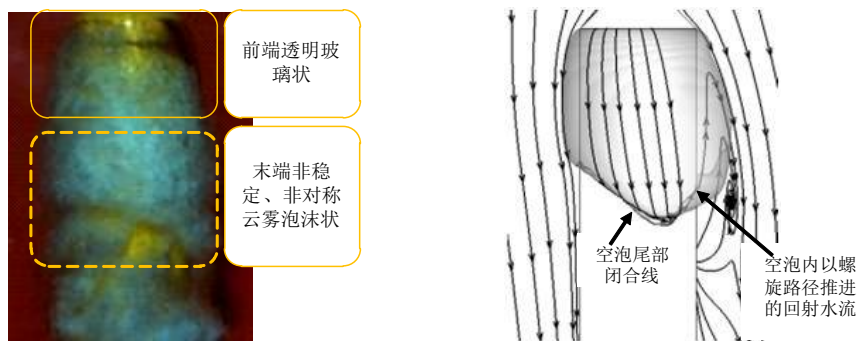


图1 轴对称回转体的空泡流现象^[1]($\sigma = 0.4$,左为压力面,右为吸力面)

Fig.1 Cavitation phenomena around axisymmetric body ($\sigma = 0.4$, Left: pressure side, Right: suction side)

回转体水下高速运动时,攻角往往不为零,附着空泡形态发生倾斜,呈现迎流区空泡短、背流区空泡长的非对称结构,空泡末端回射流闭合线倾斜于回转体柱形表面;从轴向上看,靠近回转体头部的空泡前端流动结构相对稳定,呈现透明玻璃状,而靠近闭合线的空泡末端是非稳定、非对称的空泡,呈现云雾泡沫状,见图2(a);逆压梯度驱动下的回射流沿闭合线镜像反射,流向由回转体柱形结构和空泡壁面构成的三维封闭空间,以近似螺旋状的路径向背流区推进。绕回转体的非对称云状空泡形态及流场结构见图2(b)。从流动本质上看,绕回转体非对称云状空泡是在其运动速度、环境压力及外部干扰等外部系统环境条件影响下回射流与泡壁流动剪切的三维多相流动现象,具有多介质掺混剧烈、非对称三维效应显著、流动结构演化复杂的特征。



(a) 水洞试验空泡形态^[2]

(b) 数值模拟流场结构^[3]

图2 绕回转体强掺混的非对称云状空泡

Fig.2 Strongly mixing asymmetric cloud cavitation around revolution body

由于空泡末端云状空泡区的特殊流动结构,空泡末端界面失稳导致局部空泡脱落,诱发回转体物面高量值的压力脉动冲击,影响回转体的结构强度,是影响工程研制的重要理论难题。本文针对绕回转体非对称云状空泡稳定性及流动控制问题,分别从云状空泡试验观测与数值模拟方法、云状空泡流场结构与界面稳定性、空泡多相流调节方法与控制机理三个方面,对国内外研究现状及发展动态进行

总结,旨在为绕回转体空泡流的稳定性问题研究提供参考。

1 云状空泡试验观测与数值计算方法研究与进展

绕回转体的非对称云状空泡流是强掺混的非定常复杂流动现象,涉及气-汽-水多相介质、多尺度瞬变流场结构,研究难度大,试验测量与数值计算是学者们开展云状空泡研究的重要手段。

在云状空泡的实验研究方面,目前针对云状空泡多采用非接触式光学观测、物面压力测量、粒子图像测速技术、接触式探针等试验测量手段,综合获取空泡形态、流场速度、物面压力、含汽分数等物理信息。在含汽率相对较低区域,空泡呈现出示踪粒子的功能,利用高速摄像可以观察到两相流场中的回射流、涡管等流动结构;物面压力测量是直接获取回转体空泡流特性的手段,通过布置在回转体表面的压力传感器,获取空泡流动的力学特性^[4];粒子图像测速技术(PIV)可对流场速度矢量进行定量和精确的瞬时测量,目前已广泛应用于多相流动的湍流流场测量^[5],但对于水汽掺混剧烈的云状空泡区域,激光经历多次不规则折射和散射,PIV 往往很难获得云状空泡区域速度信息;相比光学测量的局限性,X 射线具有更强的穿透力,Coutier 等^[6]使用新的内窥技术结合 X 射线,测量了水翼空泡的蒸汽体积分数及振荡频率等,但 X 射线技术在安全性和经济性方面限制了其应用;近年来国内外学者围绕云状空泡内部流场测量难的问题,基于水汽两相物理特性的差异,采用各种形式的探针布置在空泡内部,获得空泡内部的水汽分布信息^[7-9],双头电阻探针泡内流场测量结果见图 3,基于这种空泡内测技术可以得到云状空泡局部物理参数信息,但是无法获得云状空泡的流场结构和演化规律。不同云状空泡试验测量手段的比较见表 1。近年来,学者们尝试将高速摄像、PIV 等光学测量方法与电阻探针技术相结合,开展了云状空泡非定常特性研究^[10]。

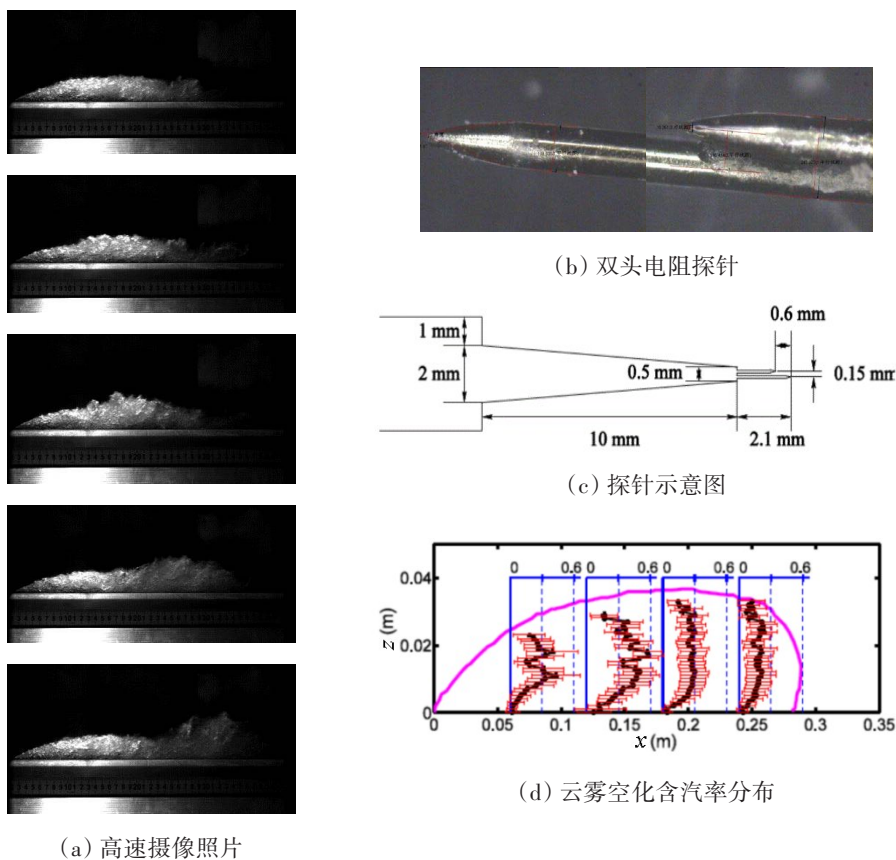


图 3 双头电阻探针泡内流场测量技术^[9]

Fig.3 Cavity interior flow field measuring technique by double electric resistance probes^[9]

表1 云状空泡试验测量手段比较

Tab.1 Comparison of cloud cavity experiment measurements

测量手段	优点	缺点
非接触式光学观测	可观察流场结构	—
物面压力测量	可直接获取空泡流体力学特性	—
粒子图像测速技术	可测量流场速度矢量	不适用于掺混剧烈的云状空泡
X射线内窥技术	可测量相体积分数及振荡频率	安全性和经济性不足
接触式探针	可测量空泡内部水汽分布	无法获得流场结构和演化规律

在云状空泡数值计算方法方面,蒸汽相及不可凝结气相之间多相介质的相互作用过程、气-汽-水多介质掺混、流场的可压缩性模拟是获得精确流场信息的关键。针对云状空泡的多相流动特点, Singhal等^[11]运用Rayleigh-Plesset气泡动力学方程导出了控制气液相转换的源项,建立了蒸汽质量分数输运方程,计算了小攻角定常空泡流的形态和表面压力分布;Saito等^[12]采用基于蒸汽质量分数输运方程,采用TVD-MUSCL格式计算了空泡脱落过程;Kunz^[13]、Vaidyanathan^[14]考虑云状空泡液相、蒸汽相及不可凝结气相多相介质的输运过程,建立了同时考虑自然和通气空泡的仿真模型;于海东^[15]针对绕回转体的空泡群脱落机制,提出能体现空泡群内部非线性物理特性的新空化模型,基于DES方法成功实现了对平头回转体空泡脱落的模拟(图4);针对回射流作用下空泡内部多介质强掺混的非定常过程, Bensow和Bark^[16]采用一种隐式亚格子模型的LES方法,模拟了云状空泡和稍涡空泡的动态行为,讨论了空泡内部回射流和尾流结构等关键机理。由于云状空泡回射流动强烈的汽-气-水掺混作用,汽-气-水混合介质的可压缩性也是需要予以考虑的因素^[17-18]。采用考虑可压缩性的LES模拟方法,学者们尝试研究了 $Re=10^6$ 的高雷诺数下的空泡流计算^[19],实现了云状空泡局部小尺度空泡流场结构的精细化仿真^[20-21],结合Favre滤波,模拟了湍流空泡的小尺度不规则脱落^[22],结合理论分析,讨论了瞬态涡空泡结构从二维向三维转化的过程^[23]。

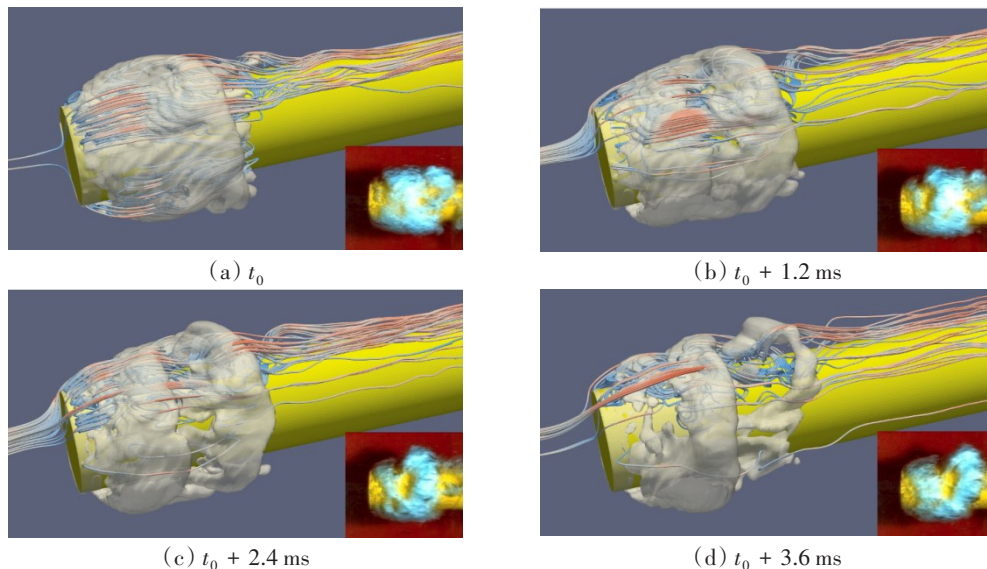


图4 轴对称回转体空泡群脱落数值模拟^[15]

Fig.4 Numerical simulation of cavity cluster shedding around axisymmetric revolution body^[15]

当前针对云状空泡的实验和数值模拟方法还存在空泡内部三维流场结构信息捕捉不全、大空间尺度下云状空泡小尺度涡系结构模拟精度低、空泡破碎急剧细化过程模拟不准确等问题。未来需重点针对云状空泡强掺混的非定常流动特点,建立云状空泡内复杂多相流动与外部空泡形态相结合的流场观测方法,发展考虑气-水掺混、气相可压缩、多尺度结构演化的空泡多相流场结构的数学模型,结合高精度的界面捕捉技术和自适应网格技术,形成高精度的数值计算方法。

2 云状空泡内流场结构与空泡界面稳定性研究与进展

空泡流动状态与外部运动条件、物体构型有关,具有多种多样的流场特征,其中云状空泡是空泡流动形态的一种^[24]。绕回转体的云状空化普遍是由于流动剪切导致低压诱发的流动现象^[3],云状空泡是流动现象最丰富、流场结构最复杂、非稳态特性最显著的流动形态,对回转体构型航行器的工作状态、运行效能和系统安全等方面都有至关重要的影响。Laberteaux 和 Ceccio^[25]研究表明,可以将附体空泡分为稳定的透明玻璃状区域与非稳定的云雾泡沫状区域,在非稳定的泡沫状区,空泡内部多相介质掺混剧烈,具有流场结构复杂、瞬变的非稳定流动特点。绕回转体非对称空泡改变了其物面的压力分布^[26],航行产生的空泡形成壁面效应,对回转体沾湿区受力也会产生一定影响^[27]。Kawanami 对片状空泡的三维特性进行了研究,认识到三维特征对空泡的断裂与脱落具有重要影响,附着的片空泡在空泡断裂处呈明显的“U”形^[28]。国内外学者对回射流影响下云状空泡流场结构以及空泡界面稳定性方面开展的研究具有一定参考价值。

空泡末端回射流是在一定条件下形成和发生的,空泡必须具有一定的厚度且在空泡末端逆压梯度足够大时才能够形成空泡末端回射流^[29-30]。回射流对云状空泡的形成和流场结构演化具有重要影响,回射流的形成及其演化规律与空泡的脱落特征密切相关^[31],是引起云状空泡不稳定流动的至关重要的因素^[32]。Peng^[34]、Arabnejad^[35]的研究还发现了回射流作用下云状空泡演化过程中的马蹄涡结构;针对扭曲翼型的空泡流研究发现三维效应是影响空泡末端回射流动特征的重要外部因素,当空泡闭合线有倾斜时,压力梯度会在闭合线上反射形成斜向的回射流^[36]。

空泡不稳定流动及其脱落问题是影响装备性能的重要问题,一直是空泡流研究的热点。空泡在本质上都是非稳态的,空泡流的非稳定性是由“内在非稳定性”和“系统非稳定性”两个方面的因素决定的,其中“内在非稳定性”源于空泡自身(如回射流)所引起的空泡不稳定性,“系统非稳定性”是源于空泡与周围环境(如构型、来流条件、环境压力等)的相互作用^[38]。针对云状空泡的“内在非稳定性”,Croci 等^[39]讨论了云状空泡在空泡末端回射流、边界层作用等内部因素作用下的流动特征,Mithun 等^[40]分析了空泡断裂和云状空泡形成过程中的 Kelvin-Helmholtz 不稳定性现象。在云状空泡的“系统非稳定性”方面,黄彪等^[41]研究了绕回转体构型的非稳态空泡,捕捉了在一定外部系统环境条件下空泡的断裂脱落现象;王国玉等将绕回转体云状空泡演化分为快速生长、小幅脉动和周期性脱落三个阶段,并分析了回射流以及攻角对空泡稳定性的重要影响^[42],绕回转体云状空泡不同截面的流场结构见图 5;万初瑞等^[43]基于轴对称体自然空泡流脉动过程分析,获得了水动力外形与攻角等外部系统环境条

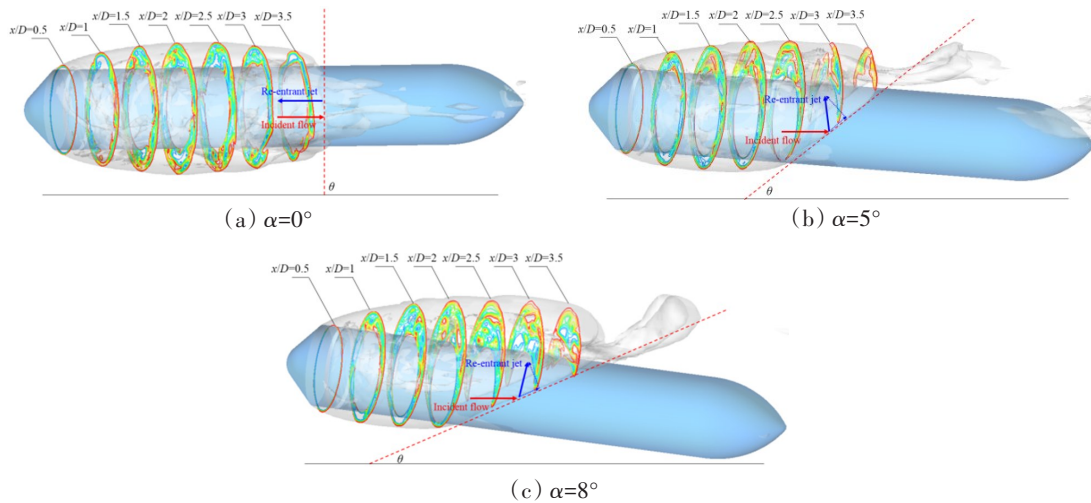


图 5 绕回转体不同截面的空泡流场结构^[42]

Fig.5 Cavitation flow structure at different cross sections around revolution body^[42]

件对空泡脱落频率的影响; 王一伟等^[44]基于对回射流条件下云状空泡演化规律的认识, 建立了回射流的动力学模型, 得到了绕回转体空泡宏观特征稳定性的判据表达式及其相似律。

近年来, 专家学者针对非对称云状空泡形成、回射流影响及空泡稳定性开展了研究, 但针对绕回转体的云状空泡研究还存在多尺度流场结构表征方法不健全、外部系统环境条件影响下的末端局部失稳模式不清楚等问题, 特别是针对回转体柱形三维结构的影响考虑不足。未来需要重点关注三维结构约束下的非对称云状空泡末端的回射流在背流区的聚集, 开展多介质强掺混流场的涡结构演化机制和失稳模式研究, 以实现回转体非对称云状空泡流场结构的量化表征, 为工程研制提供支撑。

3 空泡多相流调节方法与控制机理研究与进展

对空泡稳定性的控制可采用多种方式, 目前的研究主要分为两种方案: 一种是被动调节, 如在物面布置障碍物^[45]、优化水动头型^[46]等方式, 一种利用双锥头型调节空泡流的形态见图6; 其二是主动通气调节, 通过向空泡内通气抑制回射流实现流动调节的目的。考虑工程实际, 多采用通气技术实现对空泡稳定性流动调控, 目前通气对大尺度空泡宏观流态的调节和控制上取得了较好的效果。在通气空泡的基础研究方面, 国内外学者重点针对通气空泡整体形态以及流体动力方面开展工作。

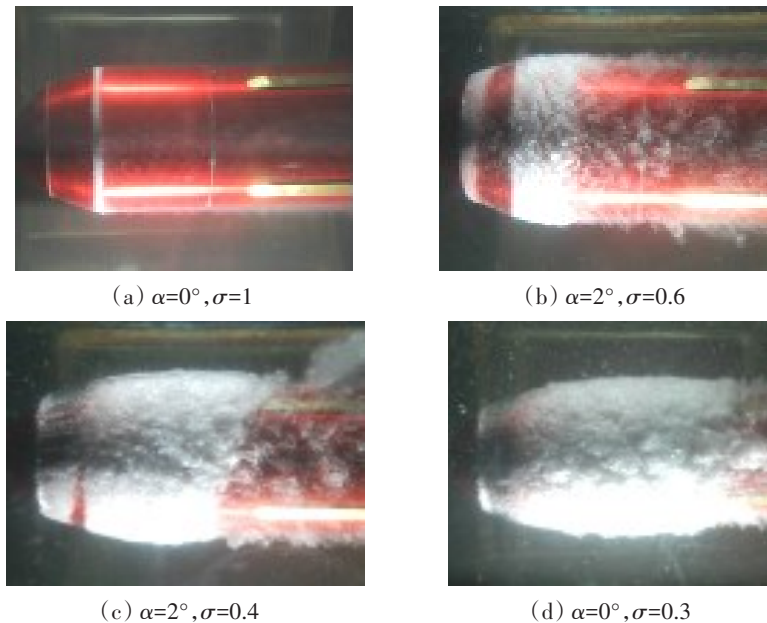
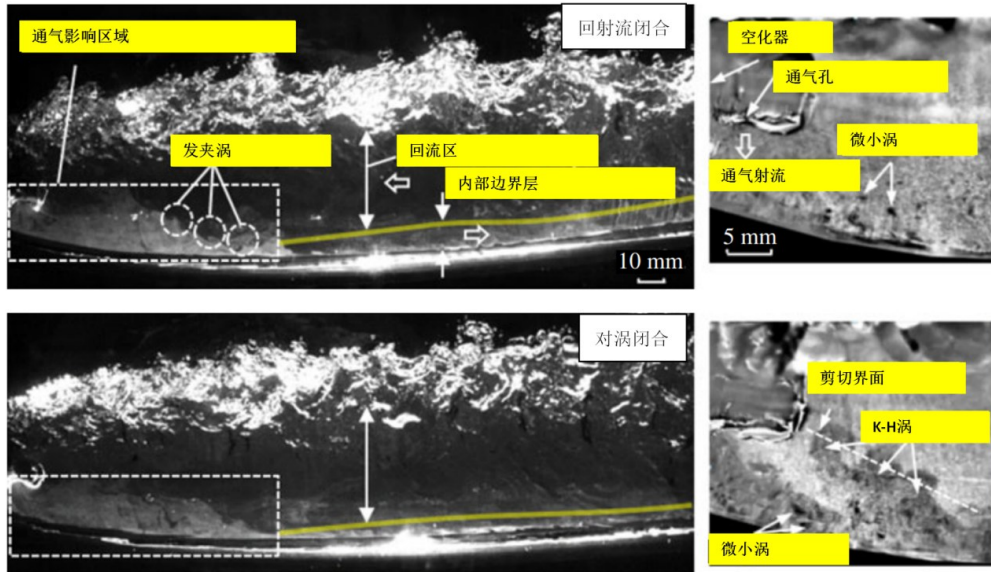


图6 双锥头型回转体空泡流现象^[46]

Fig.6 Cavitation phenomena around revolution body of double-taper headform^[46]

针对通气云状空泡形态的研究, 重点关注了通气空泡内部流场结构以及空泡末端的泄气模式。在通气空泡的流场结构方面, Wu等^[47]将通气空泡内部分为三个不同区域, 包括通气影响区、汽-水界面边界层和逆流区, 并发现在剧烈的剪切作用下, 泡内流场中可见各种涡结构(发夹涡、K-H涡), 见图7; 黄彪^[48]、时素果^[49]分析了绕圆盘空化器的通气空泡的气水界面结构演化机制。在云状空泡末端的泄气模式方面, Kinzel等^[50-51]对通气空泡双涡管泄气和反向射流泄气过程进行了仿真, 对反向射流引起的空泡尾部气水混合现象进行了预估, 获得了空泡区域内的反向射流现象及大尺度空泡团的整体脱落特性; Lindau等^[52]分析了不同通气量下通气空泡尾流由反向射流泄气向双涡管泄气的转化过程; 贾力平^[53]通过实验观测到 Semenenko^[54]提出的两种通气空泡泄气方式, 指出形成指定尺寸的通气超空泡需要的通气量主要依赖于自然空泡数和傅汝德数; 张学伟等^[55]分别在水池和中速水洞中开展了射弹实验和通气空泡实验, 比较了相同空化数下自然空泡和通气空泡形态, 改进了由于浮力作用导致的中轴线偏移量计算公式。

图7 通气空泡内流动模式^[47]Fig.7 Internal flow patterns inside the ventilated cavity^[47]

通气空泡改变了空泡的流动形态,对回转体的受力特性产生重要影响。通气可以抑制旋涡空化所引起的主要频段的振动强度^[56],改变物面压力脉动特性^[57],改善航行体的流体动力^[58],具有降载增稳的效果^[59-60]。当前研究以通气云状空泡宏观特征和整体受力为主,缺少对通气瞬时以及通气过程细观流场结构的精细刻画,通气非对称云状空泡的入射气流与末端回流流强相互作用及其演化规律不清楚,未能从本质上掌握绕回转体的云状空泡末端局部云状空泡稳定性通气调控机制。国内外学者针对绕回转体的通气空泡的末端流动状态进行了探索,掌握了回转体通气空泡末端的泄气模式和流动状态^[61-62]。未来针对回转体通气流动控制还需加强通气入射气流与云状空泡回流流的相互作用机制、非对称通气云状空泡流场结构演化等方面的研究,以揭示通气增稳的物理本质,更好地为工程上的通气设计提供支撑。

4 绕回转体非对称云状空泡流稳定性研究面临的挑战

从上述的研究现状分析可知,在绕回转体非对称云状空泡机制研究、基于通气措施的空泡多相流动调控方面均存在较大挑战。

(1) 绕回转体云状空泡流场的细观结构和流场演化机制研究面临的挑战体现在:一是由于云状空泡汽-水界面不规则折射和微气泡干扰等问题,针对流场结构的光学测量存在先天不足,间接的物面压力测量又存在空间分辨率低、有效测量信息少的问题,缺乏直接表征流场结构的方法;二是空泡末端汽水掺混流态导致流场密度、粘度及速度等参数随时空剧烈变化,回转体尺度与流场结构尺度的差异巨大,现有的数值模型难以兼顾宏观尺度空泡的非定常演化和云状空泡细节流动结构的捕捉。

(2) 提升回转体非对称云状空泡流稳定性是工程上重点关注的问题,非对称云状空泡通气流动调控的挑战在于:非对称云状空泡流涉及气-汽-液瞬态复杂多相三维多尺度流动,空泡内部流动剪切剧烈、涡结构丰富,流场结构演化机制复杂,并带来随机、离散的力学效应;采取通气流动控制措施,又涉及气体射流膨胀、气液界面流动剪切、气泡振荡等因素的影响,往往限制回转体云状空泡稳定流动控制的效果。

总的来说,绕回转体非对称云状空泡具有气-汽-水多介质剧烈掺混、三维效应显著、多尺度流场结构的特点,流动机理十分复杂,需要在找到诱发空泡失稳机制的基础上,形成回转体非对称云状空泡的调控方法。

5 回转体非对称云状空泡流稳定性研究重点方向

针对绕回转体非对称云状空泡流场结构演化及流动控制问题, 聚焦空泡末端回射流与空泡壁面流动剪切耦合作用, 必须丰富非对称云状空泡多相流场研究手段, 实现对绕回转体空泡流场的准确预示, 揭示非对称云状空泡多尺度流场结构及演化机制, 掌握通气空泡气体射流与回射水流相互作用规律, 为提升回转体构型水下航行体运行可靠性和整体性能提供科学依据和方法支撑。因此后续研究工作的重点应主要包括以下三个方面:

(1) 回转体非对称云状空泡内流场结构预示与表征方法研究

绕回转体三维非对称云状空泡流场结构是空泡流稳定性研究的核心问题, 需要从外部系统环境条件影响下多介质的流场特征、多尺度空泡流场结构演化机制等方面开展精细化的试验测量、数值模型等研究工作, 综合高速摄像、PIV等光学测量方法与光纤探针技术发展和完善相关试验方法, 进一步发展云状空泡的高精度数值计算模型, 结合高精度的界面捕捉方法, 实现绕回转体非对称云状空泡多相界面破碎、掺混、内部复杂流动结构的准确捕捉, 获得绕回转体云状空泡复杂流场结构的要素特征, 揭示多尺度流场结构的演化机理, 实现对多介质、多尺度云状空泡的准确描述。

(2) 三维效应影响下回转体云状空泡末端不稳定特性研究

尽管对绕回转体非对称云状空泡整体的稳定性取得了一定的认识, 也通过流动控制得到了较好的解决, 但在回转体柱形三维结构的影响下, 绕回转体云状空泡回射流在回转体背流区一侧碰撞、聚集, 形成复杂的局部强湍流脉动, 并与空泡壁面形成剪切导致空泡不稳定流动, 诱发高量值的水动外压, 因此绕回转体的空泡流动必须考虑三维结构影响, 揭示回转体空泡末端流场结构及其失稳机制, 分析非对称云状空泡末端局部泡壁失稳模式和主要影响因素, 建立绕回转体云状空泡末端失稳准则, 为工程上的水动力设计提供理论支撑。

(3) 回转体非对称云状空泡稳定性通气调控机制

向回转体非对称云状空泡内部通气的过程中, 入射气流与空泡回射流会形成强冲击掺混的过程, 原有的云状空泡发生急剧的膨胀, 空泡形态及其诱发的水动力学特征发生剧烈变化, 在多因素的影响下, 绕回转体云状空泡稳定性调控效果具有不确定性, 特别是针对空泡末端的局部流场调控难度更大。通过对回转体气-汽-水复杂多相流场的耦合作用机制的研究, 找到绕回转体非对称云状空泡流稳定性的主控因素, 并掌握绕回转体通气调节状态下的空泡流体动力特性。

6 结 语

本文围绕回转体非对称云状空泡流动稳定性及流动控制技术, 系统梳理了国内外学者在研究手段、云状空泡流场结构与界面稳定性、流动调节方法三个方面的研究成果, 并结合空泡流的学术研究热点、工程研制需要, 总结了未来的主要发展方向, 提出未来以非对称云状流场结构预示、回转体柱形结构三维效应影响下的非对称云状空泡局部不稳定特性及云状空泡的通气调控机制为研究重点, 期望促进空泡多相流基础研究, 为工程研制提供借鉴。

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, 2008, 23(6): 662-667.
Quan Xiaobo, Li Yan, Wei Haipeng, et al. An experiment study on cavitation of underwater vehicle's surface at large angles of attack[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2008, 23(6): 662-667.
- [2] 孔德才, 裴金亮, 于海涛, 李 岩. 绕回转航行体通气空泡末端泄气模式研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2017, 4: 13-16.

- Kong Decai, Pei Jinliang, Yu Haitao, Li Yan. Research on gas leakage mechanism of ventilated cavitating flows around an axisymmetric body missiles and space vehicles[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2017, 4: 13–16.
- [3] 孔德才, 黄彪, 魏海鹏, 尤天庆. 绕斜锥头型回转体分离涡空化特性分析[J]. *北京理工大学学报*, 2018, 38(9): 921–926.
Kong Decai, Huang Biao, Wei Haipeng, You Tianqing. Numerical analysis of the vortex cavitation around the revolution body with cone-shaped headform[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(9): 921–926.
- [4] 刘桦, 刘庆华, 胡天群. 带空泡轴对称细长体水动力脉动的实验研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2004, 19(6): 794–800.
Liu Hua, Liu Qinghua, Hu Tianqun. An experimental study on fluctuating hydrodynamic loads on cavitating axisymmetric slender bodies[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2004, 19(6): 794–800.
- [5] Gopalan S, Kate J. Flow structure and modeling issues in the closure region of attached cavitation[J]. *Physics of Fluids*, 2000, 12(4): 3414–3431.
- [6] Coutier-Delgosha O, Stutz B, Vabre A, Legoupil S. Analysis of cavitating flow structure by experimental and numerical investigations[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 578: 171–222.
- [7] Lyer C O, Ceccio S L. The influence of developed cavitation on the flow of a turbulent shear layer[J]. *Physics of Fluids*, 2002, 14(10): 3414–3431.
- [8] Stutz B, Reboud J L. Measurements within unsteady cavitation[J]. *Experiments in Fluids*, 2000, 29(6): 545–552.
- [9] 万初瑞. 空泡流内部流场和轴对称体非定常空泡流特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
Wan Churui. Study on flow field inside cavitation region and unsteady characteristics of cavitating flow around an axisymmetric body[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [10] Pham T M, Larrarte F, Fruman D H. Investigation of unsteady sheet cavitation and cloud cavitation mechanisms[J]. *Journal of Fluid Engineering*, 1999, 121: 289–296.
- [11] Singhal A K, Athavale M M, Li H Y, et al. Mathematical basis and validation of the full cavitation model[J]. *Fluids Eng.*, 2002, 124: 617–624.
- [12] Saito Y, Nakamori I, Ikohagi T. Numerical analysis of unsteady vaporous cavitating flow around hydrofoil[C]//Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, 2003.
- [13] Kunz R F, Boger D A, Chyczewski T S, et al. Multi-phase CFD analysis of natural and ventilated cavitation about submerged bodies[C]//Proceedings of Fluids Engineering Division 56 Summer Meeting, San Francisco, USA, 1999.
- [14] Vaidyanathan R, Senocak I, Wu J Y. Sensitivity evaluation of a transport-based turbulent cavitation model[J]. *Journal of Fluid Engineering*, 2003, 125(5): 447–458.
- [15] 于海东. 非定常空化多相流的高精度模拟方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2021.
Yu Haidong. Research on the methodology of elaborate simulation for unsteady cavitating multiphase flows[D]. Beijing: Tsinghua University, 2021.
- [16] Bensow R E, Bark G. Implicit LES predictions of the cavitating flow on a propeller[J]. *Journal of Fluid Engineering*, 2010, 132(4): 041302.
- [17] Roohi E, Zahiri A P, Passandideh-Fard M. Numerical simulation of cavitation around a two-dimensional hydrofoil using VOF method and LES turbulence model[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37: 6469–6488.
- [18] Luo X, Ji B, Peng X, et al. Numerical simulation of cavity shedding from a three-dimensional twisted hydrofoil and induced pressure fluctuation by large-eddy simulation[J]. *Journal of Fluid Engineering*, 2012, 134: 041202.
- [19] Wang G, Ostoja-Starzewski M. Large eddy simulation of a sheet/cloud cavitation on a NACA0015 hydrofoil[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2007, 31(3): 417–447.
- [20] Gong Z, Chen Y, Li J, et al. Numerical study on the unsteady characteristics of the propeller cavitation in uniform and non-uniform wake flows[J]. *China Ocean Engineering*, 2020, 34(5): 688–696.
- [21] Chen Y, Li J, Gong Z, et al. Large eddy simulation and investigation on the laminar-turbulent transition and turbulence-cavitation interaction in the cavitating flow around hydrofoil[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 112:300–322.
- [22] Dittakavi N, Chunekar A, Frankel S. Large eddy simulation of turbulent-cavitation interactions in a Venturi nozzle[J]. *Fluids Eng.*, 2010, 132(12): 121301.
- [23] Ji B, Luo X, Peng X, Wu Y. Three-dimensional large eddy simulation and vorticity analysis of unsteady cavitating flow around a twisted hydrofoil[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2014, 25: 510–519.

- [24] Franc J P. Partial cavity instabilities and re-entrant jet[C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Cavitation, California, USA, 2001.
- [25] Laberteaux K R, Ceccio S. Partial cavity flows. Part 1. Cavities forming on models without spanwise variation[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2001, 431: 1-41.
- [26] 陈 瑛, 鲁传敬, 郭建红, 曹嘉怡. 大攻角水下航行体侧面空化特性的数值分析[J]. *弹道学报*, 2011, 23(1): 45-49.
Chen Ying, Lu Chuanjing, Guo Jianhong, Cao Jiayi. Numerical analysis on the characteristics of side cavitation around submerged vehicle with large attack angle[J]. *Journal of Ballistics*, 2011, 23(1): 45-49.
- [27] 孔德才, 权晓波, 魏海鹏, 等. 锥柱航行体肩空泡界面效应对头锥面受力的影响研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2015, 30(2): 201-217.
Kong Decai, Qun Xiaobo, Wei Haipeng, et al. Influence of cavitation interface effect of cone-column vehicle on the forces of the cone[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2015, 30(2): 201-217.
- [28] Kawanami Y, Kato H, Yamaguchi H. Three-dimensional characteristics of the cavities formed on a two-dimensional hydrofoil[C]//Third International Symposium on Cavitation, Grenoble, France, 1998.
- [29] Franc J P, Michel J M. *Fundamental of cavitation*[M]. Amsterdam: Kluwer Academic, 2004.
- [30] Brandner P A, Walker G J, Niekamp P N. An experimental investigation of cloud cavitation about a sphere[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010, 656: 147-176.
- [31] Owis F M, Nayfeh A H. Numerical simulation of 3-D incompressible multi-phase flows over cavitating projectiles[J]. *European Journal of Mechanics*, 2004, 23(2): 339-351.
- [32] De Giorgi M G, Fontanarosa D, Ficarella A. Characterization of unsteady cavitating flow regimes around a hydrofoil, based on an extended Schnerr-Sauer model coupled with a nucleation model[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 115: 158-180.
- [33] Trummler T, Schmidt S J, Adams N A. Investigation of condensation shocks and re-entrant jet dynamics in a cavitating nozzle flow by large-eddy simulation[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2020, 125: 103215.
- [34] Peng X, Ji B, Cao Y, et al. Combined experimental observation and numerical simulation of the cloud cavitation with U-type flow structures on hydrofoils[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2016, 79: 10-22.
- [35] Arabnejad M H, Amini A, Farhat M, Bensow R E. Numerical and experimental investigation of shedding mechanisms from leading-edge cavitation[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 119: 123-143.
- [36] De Lange D F. *Observation and modeling of cloud formation behind a sheet cavity*[D]. Netherlands: University of Twente, 1996.
- [37] Brunhart M, Soteriou C, Gavaises M, et al. Investigation of cavitation and vapor shedding mechanisms in a Venturi nozzle[J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32: 083306.
- [38] Callenaere M, Franc J P, Michel J M, Riondet M. The cavitation instability induced by the development of a re-entrant jet [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2001, 444: 223-256.
- [39] Croci K, Ravelet F, Danlos A, et al. Attached cavitation in laminar separations within a transition to unsteadiness[J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31: 063605.
- [40] Mithun M G, Koukouvinis P, Gavaises M. Numerical simulation of cavitation and atomization using a fully compressible three-phase model[J]. *Physical Review Fluids*, 2018, 3: 064304.
- [41] 黄 彪, 王国玉, 权晓波, 张敏弟. 绕平头回转体非定常空化流体动力特性研究[J]. *实验流体力学*, 2011, 25(2): 22-28.
Huang Biao, Wang Guoyu, Qun Xiaobo, Zhang Mindi. Study on the unsteady cavitating flow dynamic characteristics around a 0° caliber ogive revolution body[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2011, 25(2): 22-28.
- [42] Wang G, Kong D, Wu Q, et al. Physical and numerical study on unsteady shedding behaviors of ventilated partial cavitating flow around an axisymmetric body[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 197: 106884.
- [43] 万初瑞, 王本龙, 刘 桦. 带攻角轴对称体自然空泡流脉动特征的数值分析[J]. *力学季刊*, 2017, 38(2): 303-310.
Wan Churui, Wang Benlong, Liu Hua. Numerical simulation of fluctuating characteristics of cavitating flow around axisymmetric body at angle of attack[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2017, 38(2): 303-310.
- [44] 王一伟, 黄晨光, 吴小翠, 等. 航行体水下垂直发射空泡脱落条件研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(11): 33-39.
Wang Yiwei, Huang Chenguang, Wu Xiaocui, et al. Investigation of cavities shedding condition on underwater vehicles in the vertical launch process[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(11): 33-39.

- [45] Kawanami Y, Kato H, Yamaguchi H, et al. Mechanism and control of cloud cavitation[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1997, 119: 788–794.
- [46] 魏海鹏, 权晓波, 孔德才. 双锥头型回转体空化特性实验研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2017, 32(2): 175–181.
Wei Haipeng, Quan Xiaobo, Kong Decai. Experimental investigation of cavitating flows around an axisymmetric body with double-taper headform[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2017, 32(2): 175–181.
- [47] Wu Y, Liu Y, Shao S, Hong J. On the internal flow of a ventilated supercavity[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 862(11): 35–65.
- [48] Huang Biao, Wang Guoyu, Zhang Mindi, Chen Weiqing. Level set method for simulation of cavitating flows[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2011, 15(3): 208–215.
- [49] 时素果, 王国玉, 余志毅, 张敏弟. 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): 1100–1106.
Shi Suguo, Wang Guoyu, Yu Zhiyi, Zhang Mindi. Evaluation of the filter-based turbulence model (FBM) for computation of unsteady ventilated-supercavitating flows[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2012, 16(10): 1100–1106.
- [50] Kinzel M P, Lindau J W, Kunz R F. Free-surface proximity effects in developed and super-cavitation[C]//*Dod Hpcmp Users Group Conference*, IEEE Computer Society, 2008.
- [51] Kinzel M P, Lindau J W, Peltier L J, et al. Detached-eddy simulations for cavitating flows[J]. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Paper*, 2007, 124(2): 4089–4098.
- [52] Lindau J W, Kunz R F. Advancement and application of multiphase CFD modeling to high speed supercavitating flows[R]. *The Pennsylvania State University Applied Research Lab*, 2004, N00014–0J–J–0325.
- [53] 贾力平. 空化器诱导超空泡特性的数值仿真与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
Jia Liping. Numerical simulation and experimental study on supercavity characteristic induced by cavitators[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [54] Semenko V N. Artificial super-cavitation. physics and calculation[J]. *Artificial Supercavitation Physics & Calculation*, 2001, 12(3): 257–264.
- [55] Zhang X W, Wei Y J, Zhang J Z, et al. Experimental research on the shape characters of natural and ventilated super-cavitation[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, 19(5): 564–571.
- [56] 王国玉, 曹树良. 通气对空化引起振动的影响[J]. *水力发电学报*, 2001, 2(1): 55–62.
Wang Guoyu, Cao Shuliang. Ventilation effects on cavitation induced-vibration[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2001, 2(1): 55–62.
- [57] Sun T, Wang Z, Zou L, Wang H. Numerical investigation of positive effects of ventilated cavitation around a NACA66 hydrofoil [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 197: 106831.
- [58] 张孝石, 王 聪, 张耐民, 赵成功. 通气航行体表面压力脉动特性实验研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(17): 85–90.
Zhang Xiaoshi, Wang Cong, Zhang Naimin, Zhao Chenggong. Tests for pressure fluctuating characteristics around a ventilated underwater vehicle[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(17): 85–90.
- [59] 刘筠乔, 鲁传敬, 李 杰, 曹佳怡. 导弹垂直发射出筒过程中通空气泡流研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2007, 22(5): 549–554.
Liu Yunqiao, Lu Chuanjing, Li Jie, Cao Jiayi. An investigation of ventilated cavitating flow in vertical launching of a missile [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2007, 22(5): 549–554.
- [60] 孙铁志, 魏英杰, 王 聪, 曹 伟. 孔状通气条件下潜射航行体流体动力特性研究[J]. *兵工学报*, 2013, 34(11): 1424–1430.
Sun Tiezhi, Wei Yingjie, Wang Cong, Cao Wei. Research on hydrodynamic characteristics of submarine launched vehicle with ventilation holes[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(11): 1424–1430.
- [61] 刘涛涛. 绕回转体通气空化多相流流态特征与空泡脱落特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
Liu Taotao. Study on the flow pattern and cavity shedding characteristics of ventilated cavitating flows[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.
- [62] 李 杰. 高速水下航行体带空泡出水研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
Li Jie. Study on water-exit with cavitation of high-speed underwater body[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.