https://doi.org/10.1051/jnwpu/20193710093

双圆盘空化器射弹通气超空泡形态特性实验研究

邓飞, 熊伟, 周江磊, 郑丹丹, 苏小阳, 唐勇

(西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

摘 要:基于空泡截面独立扩张原理,提出了一种应用于水下射弹的双圆盘空化器。并在高速循环水洞中对此系列双圆盘空化器的空泡生成特性和形态特性进行实验研究。实验通过改变通气流量系数,观察了不同锥顶角下的通气超空泡形态。实验表明,此系列双圆盘空化器诱导生成的通气超空泡存在前盘优先和后盘优先 2 种空化状态,二者的过渡发生在锥顶角 55°附近;生成稳定通气超空泡的临界通气流量系数值与锥顶角呈正相关趋势,前盘和后盘对空泡生成具有相互抑制作用;且通气超空泡的形态特征量不随通气流量系数增加而持续增加,而是存在一个通气流量系数上限值。

关 键 词:射弹;双圆盘空化器;通气超空泡;通气流量系数;空泡形态特征量

中图分类号:TJ67 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-2758(2019)01-0093-07

超空泡射弹是一种用于舰船末端防御的常规性武器,其原理是超空泡减阻技术[1]。所以研究超空泡射弹头部空化器及其诱导生成的超空泡特性对获取稳定、有效的超空泡流型具有重要意义。在这方面,美国海军水下作战中心(NUWC)做了诸多尝试,最终确定圆盘、圆锥 2 种具有良好空化性能的空化器[2]。围绕这 2 种空化器,国内学者亦做了大量研究。其中,贾力平等[3-4]通过实验和数值模拟分析了空化器头型、几何参数、空化数等对超空泡形成和发展的影响;贾夫园等[5-6]利用高速循环水洞,探究了锥形空化器和带翼锥形空化器的流体动力特性;孟庆昌等[7]对水下亚声速圆盘空化器射弹超空泡流型进行了数值模拟,得到了超空泡流型与空化数间的变化关系;张木等[8]对 1/4 球形、150°锥角圆锥形、圆盘形空化器进行了大涡模拟,探究了空化器形状、直径对超空泡初生位置的影响;方城林等[9-10]研究了平头、截球头、截锥头、锥头、球头等多种头型射弹的高速垂直入水、低速倾斜入水问题。除这 2 种典型空化器外,Savchenko[11]提出了一种抗外界力矩干扰,有浅凹槽的、多边形空化器;胡晓等[12]提出了一种可用于调节水下航行体侧向力的变阻力空化器。

当超空泡射弹在水下高速运动时,射弹的尾部与空泡壁面发生连续反弹碰撞,即尾拍现象[13],而射弹的稳定航行很大程度上依赖于超空泡形态。针对此种现象,本文根据空泡截面独立扩张原理 提出了一种速度适应性强的双圆盘空化器。其优势在于:在射弹高速运动阶段可由前端小盘产生包裹射弹的最佳直径超空泡流型,减弱尾拍现象;当射弹速度衰减至前端小盘诱导生成的超空泡无法包裹弹体时,则由后端大盘产生的超空泡包裹弹体。本文利用封闭式高速循环水洞对此系列双圆盘空化器在不同通气流量系数条件下的通气超空泡生成特性和形态特性进行实验研究。

1 实验设备与模型

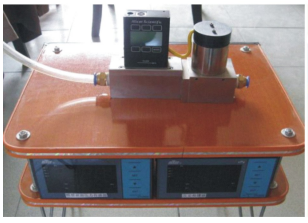
1.1 实验设备

本实验在西北工业大学高速水洞实验室开展,该水洞为封闭式循环水洞,是开展水下航行器流体力学研究的大型基础实验平台。其洞体上下圆筒中心距 11.5 m,洞体左右圆筒中心距 11.8 m,实验段尺寸为 ϕ0.4 m×2 m,试验段水速(连续可调),最小空化数 0.15,水中含气量 0.3~1,主泵功率 125 kW。通气系统由 LabVIEW 编程控制,可以实现对实验模

收稿日期:2018-03-02 **基金项目**:国家自然科学基金(51275412)与航空科学基金(2015ZA53012)资助

作者简介:邓飞(1972—),西北工业大学副教授、博士,主要从事超空泡航行体流体动力学研究。

型的自动通气和质量流量反馈控制。本实验中所使用质量流量计(见图 1)量程为 0~100 L/min,精度为±1%。图像采集系统由 2 个 SONY 高速摄像机构成,摄像频率为 1 000 frame/s。实验设备总装图如图 2 所示。



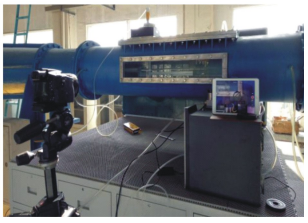


图 1 ALICAT MC 质量流量控制器 图 2 实验设备总装图

1.2 实验模型

为了能够更好地观察通气超空泡形态,我们将某型射弹模型进行简化,去掉射弹尾部翼型,仅保留其圆锥段尺寸,使空泡始终闭合在圆柱段上。实验装置模型如图 3 所示,此实验模型由双圆盘空化器、前锥段、圆柱段、过渡锥段、支撑座、支撑杆、导流罩、以及安装在模型内部的通气管构成。空化器与圆锥段采用螺纹连接,可根据不同的实验工况换装不同参数的空化器。实验模型采用尾支撑方式固定在水洞盖板上,且在盖板上安装一个翼型导流罩,支撑杆穿过导流罩空腔而不与来流直接接触,可避免来流流过支撑杆时因脱体绕流而引起的模型振颤,进而得到更稳定的空泡流型。通气控制装置与模型内部通气管相连接,实现对射弹头部的通气。

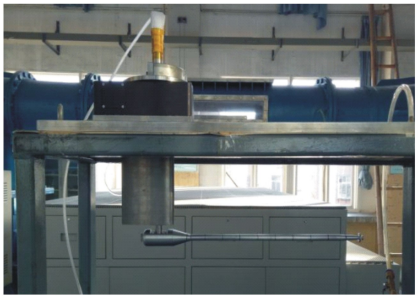


图 3 实验装置模型

双圆盘空化器模型结构示意图如图 4 所示。实验所涉及的双圆盘空化器是一种盘间距与前盘盘径比(L_1/D_1)为 0.75 的系列空化器,即固定双圆盘空化器盘间距(L_1 = 9 mm)与前盘盘径(D_1 = 12 mm),通过系列变化后盘盘径 D_2,使得双圆盘空化器的锥顶角 a 分别为 15°,30°,45°,50°,55°,60°,65°,70°,75°,80°,85°,90°,并附带一个盘径为 12 mm 的单圆盘空化器,在后文论述中将此空化器看作 0° 双圆盘空化器,系列双圆盘空化器几何模型如图 5 所示。

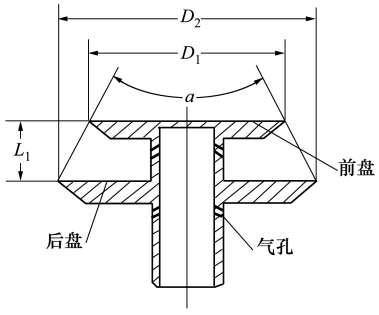


图 4 空化器二维剖视图



图 5 系列双圆盘空化器模型

2 实验内容及方法

2.1 无因次参数

在给定来流速度和水洞压力的情况下,通气超空泡的形成和发展取决于空泡内压力 p_c 的变化,即空化数变化。实验固定来流速度和水洞压力,则空化数的改变仅依靠改变通气流量系数实现,通气流量系数定义为:

$$C_q = \frac{Q}{v_\infty D_n^2} \tag{1}$$

式中,Q 为通气率,即在单位时间内流入空泡中的空气体积;v_∞ 为水洞工作段来流速度;D_n 为空化器直径。除空化数外通气超空泡的形态还与弗劳德数有关,弗劳德数定义为:

$$F_r = \frac{v_\infty}{\sqrt{gD_n}} \tag{2}$$

式中,v_∞ 为水洞工作段来流速度;D_n 为空化器直

径。对实验所得的通气超空泡形态特征量进行无量纲处理。其中无因次直径指空泡最大直径与空化器盘径之比 D_c/D_n;无因次长度指空泡长度与模型长度之比 L_C/L,由于通气超空泡的不对称性,空泡长度 L_c 取空泡上边界长度与空泡下边界长度的平均值;空泡长细比指空泡长度与空泡直径之比 L_c/D_c。

2.2　实验过程

综合双圆盘空化器空化条件和悬臂实验模型共振频率等因素。实验尝试了不同来流速度,最终将工作段水速固定为 9.5 m/s,水洞压力基本维持在 70 kPa。通过调节通气量来改变空泡内的压力,以满足不同工况下的空化数需求。文中笔者将双圆盘空化器的空泡流型由前盘主导的状态定义为前盘优先(见图 6c)),反之则为后盘优先(见图 6e))。在通气超空泡形成过程中存在一个通气流量系数值 $\bar{C}_q$,当通气流量系数达到这个值时,模型头部空泡由短小的云状空泡(见图 6a),6c),6e))瞬间跃变为具有一定长度的、相对稳定的、透明空泡,这才是具有减阻效力的通气超空泡。本文将此通气流量系数定义为临界通气流量系数。实验中对所涉及的系列双圆盘空化器临界通气流量系数测定采用二分法逐次逼近的方式。待临界通气流量系数确定后,再给定 6 组固定通气量,用高速摄像拍摄此时的超空泡流型。对于部分空化器模型在给定气量下没有出现预期实验现象的工况,按原有通气量增长幅度,继续等量增加通气量至预期实验现象出现。

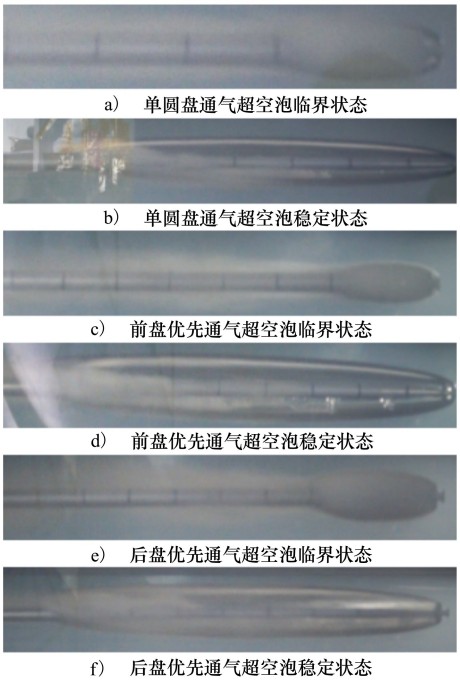


图 6　不同状态下的空泡形态

3　实验结果及分析

3.1　双圆盘空化器参数对临界通气流量系数的影响

实验发现,在锥顶角 0°~55°范围内,双圆盘空化器状态始终处于前盘优先状态。其中 55°锥顶角时,前后盘几乎同时空化,前盘要略微滞后于后盘,再继续增加通气量前盘空化所产生的空泡立刻包裹后盘,后盘的空化现象随即消失,整个空泡稳定状态的流型由前盘决定,故本文仍将此锥顶角空化器的空化状态归为前盘优先,且将 55°~60°时的状态视作此系列双盘空化器由前盘优先转为后盘优先的一个过渡状态。当双圆盘空化器的锥顶角在 60°~70°范围内,双圆盘空化器的空化状态先处于后盘优先,随通气流量系数增大至前盘临界通气流量系数值,双圆盘空化器状态变为前盘优先。当双圆盘空化器的锥顶角大于 70°时,双圆盘空化器的空化状态始终处于后盘优先。

图 7 给出了此系列双圆盘空化器锥顶角与临界通气流量系数 $\bar{C}_q$ 之间的关系曲线,其中 0°锥顶角代表单元盘时的实验工况。

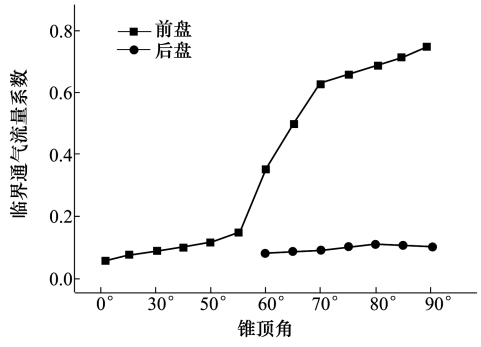


图 7　临界通气系数值——锥顶角关系图

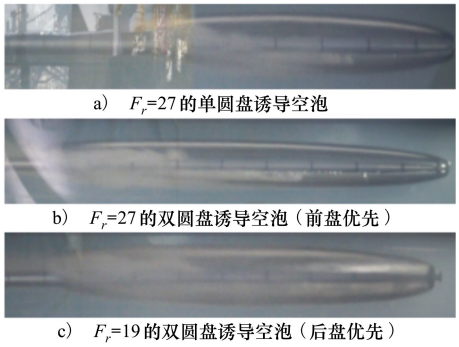
结合图 7 可知:①在锥顶角 0°~55°范围内的双圆盘空化器的临界通气流量系数值均大于单盘的临界通气流量系数值,且双圆盘空化器的临界通气流量系数值随锥顶角增大而增大。据此可知在此锥顶角范围内,双圆盘空化器的前盘空化受到后盘的抑制,且抑制作用随双圆盘空化器锥顶角的增大而增

大;②在锥顶角 60°~90°范围内,后盘临界通气流量系数值均大于单盘的临界通气流量系数值,将此结果与贾力平等[4]对单圆盘实验的结果比较,可知后盘空化亦受到前盘抑制。在锥顶角 60°~80°范围内,后盘临界通气流量系数值随锥顶角的增大而增大;当锥顶角超过 80°后,后盘临界通气系数值几乎不随锥顶角变化而改变。由此可知当锥顶角超过某一值后,前盘对后盘的抑制程度不再加剧;③当锥顶角度大于 55°后,前盘空化的临界通气系数值随锥顶角增大陡然增加;虽然锥顶角 55°~70°范围内与 70°~90°范围内临界通气系数值增加幅度不同,但均远远大于前盘优先时的增加幅度。由此可说明后盘优先时,后盘对前盘的抑制作用远大于前盘优先时后盘对前盘的抑制作用。

综上所述,双圆盘空化器空化状态的转变发生在锥顶角 55°附近,且在空化过程中前后盘间存在相互抑制作用。这种抑制作用表现为临界通气流量系数的改变,临界通气流量系数与双圆盘空化器锥顶角呈正相关趋势。

3.2 双圆盘空化器参数对空泡形态的影响

比较单圆盘空化器与双圆盘空化器所诱导的空泡流型可知:此系列双圆盘空化器诱导产生的通气超空泡流型总体呈椭球形与单圆盘空化器所诱导生成超空泡流型相似,由于重力效应超空泡上下表面存在静压差,空泡受到浮力作用,致使空泡产生变形呈不对称性,如图 8 所示。



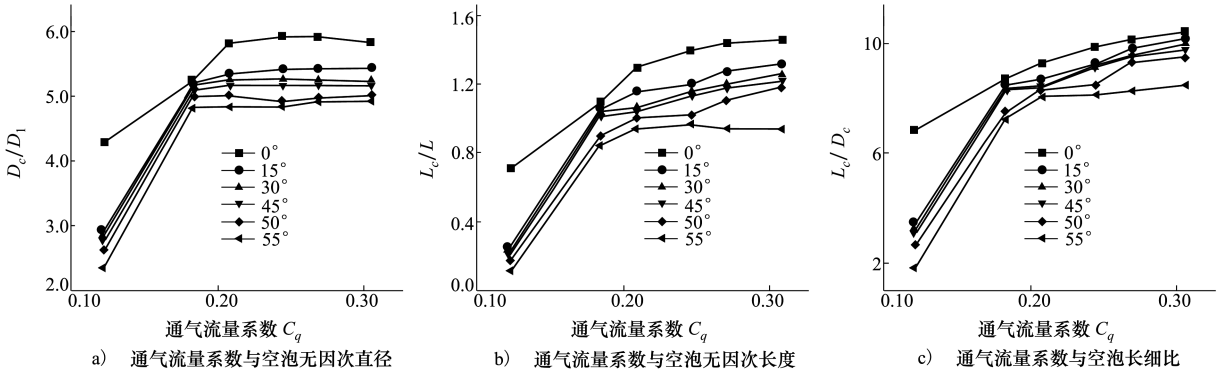
a) F_r=27 的单圆盘诱导空泡

b) F_r=27 的双圆盘诱导空泡(前盘优先)

c) F_r=19 的双圆盘诱导空泡(后盘优先)

图 8 部分不对称超空泡图片

对不同工况下空泡形态图像进行处理,可得通气流量系数与空泡形态特征量间的关系。图 9 给出了单圆盘空化器和锥顶角在 0°~55°范围内的双圆盘空化器的空泡形态特征量与通气流量系数间的关系曲线。



a) 通气流量系数与空泡无因次直径 b) 通气流量系数与空泡无因次长度 c) 通气流量系数与空泡长细比

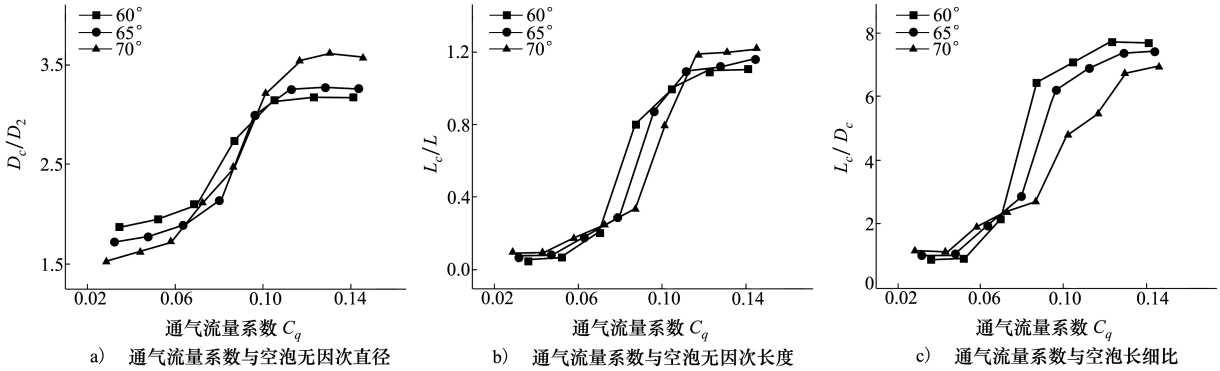
图 9 (0°~55°)通气流量系数与空泡形态关系曲线

由图 9 可知:①在相同流场参数条件下,单圆盘空化器诱导产生的通气超空泡尺度明显大于双圆盘空化器前盘诱导产生的空泡尺度,且双圆盘空化器的空泡形态特征量随锥顶角的增加而减小。这说明双圆盘空化器在前盘优先状态下,所诱导形成的通气超空泡尺度受到后盘抑制,这种抑制作用随锥顶角增大而增大。②当通气流量系数达到各空化器的临界通气系数值后,通气超空泡形态特征量发生跃变,即空泡的无因次直径变为原来的 2 倍左右,无因次长度和长细比变为原来的 4~5 倍左右,但通气超空泡的形态特征量随通气流量系数增加呈阶段性变化,即通气量系数增加到一定值后,再继续增加,通气超空泡形态特征量随之增加的幅度放缓,增长曲线趋于平缓。这表明双圆盘空化器所诱导的通气超

空泡尺度不会随通气量的增加而无限增加,而是存在一个上限值,由图 9 可知这个上限值对应的通气流量系数在 0.2 左右,这与杨武刚等[14]针对单圆盘空化器研究得出的规律基本一致,本实验的单圆盘实验也验证了这个规律。本文认为这一现象的成因:①水洞工作压力下,空气的压缩性局限;②通气量增加到某一值后,尾部闭合方式的发生改变[15]。

综上所述,双圆盘空化器诱导生成的空泡流型基本与单圆盘相似。在前盘优先状态下,从空泡形态特征量的变化规律上验证了后盘对前盘的抑制作用与锥顶角呈正相关趋势。空泡形态特征量随通气流量系数的增长存在一个上限值,这个值在 0.2 附近。

当双圆盘空化器锥顶角在 60°~70°范围内,双圆盘空化器空化状态起始处于后盘优先,即空泡流型由后盘主导,随通气流量系数增大至某一值后再转变为前盘优先。图 10 为此范围内的双圆盘空化器诱导产生的空泡形态特征量与通气流量系数间的关系曲线。由图 10 可以看出:①在后盘诱导产生的通气超空泡未达到稳态时,通气超空泡的形态特征量随通气流量系数的增加而缓慢增长;当通气流量系数至临界值,空泡发生跃变达到稳定状态。此时空泡的无因次直径变为原来的 1.5 倍左右,无因次长度变为原来的 5~6 倍,长细比变为原来的 3 倍左右;此时通气超空泡形态特征量随通气流量系数变化的规律与前盘优先时一致,存在一个上限值,具体原因前文已说明此处不再赘述。②继续增加通气量至前盘发生空化,再至前后盘空泡沟通,整个过程空泡形态相关特征量随通气流量系数的增长幅度放缓。由此可知双圆盘空化器在锥顶角 60°~70°范围内,空泡流型先处于后盘优先状态,因通气流量系数增大至前盘空化临界通气流量系数空化状态转变为前盘优先,即空泡流型由前盘主导。②另外从图 10c)还可发现,曲线在后盘临界通气流量系数值附近发生交叉;在未达到稳定状态时,此时空泡不具减阻效力可不分析,当通气流量系数达到稳定值后,此范围内通气超空泡形态特征量变化规律与 0°~55°范围内双圆盘空化器诱导生成的空泡形态特征量变化规律一致,即随锥顶角增大,前盘对后盘抑制作用亦在增加。



a)　通气流量系数与空泡无因次直径　　b)　通气流量系数与空泡无因次长度　　c)　通气流量系数与空泡长细比

图 10　(60°~70°? 通气流量系数与空泡形态关系曲线

综上所述,在后盘优先状态下,通过空泡形态特征量变化可知,后盘亦受到前盘抑制。且空泡形态特征量随通气流量系数的增加也存在一个上限值,这个值在 0.12 附近。

当双圆盘空化器锥顶角大于 70°后,由于通气量过大,尾部闭合方式改变,整个空泡流型尾部一直处于高度紊乱的湍流状态,空泡汽化率极高,无法采集到空泡的稳定状态。故而此处不再对空泡形态特征量进行单独讨论,仅对实验现象进行简单阐述。在此锥顶角范围内,双圆盘空化器始终处于后盘优先状态,继续增加通气量至前盘空化,但前后空泡无法沟通,前盘诱导产生的空泡闭合在后盘端面,部分后盘端面处于沾湿状态,整个通气超空泡呈双空泡流型。由空泡截面独立扩张原理可知,此时的后盘盘径已经超出了该实验条件下前盘在该截面所对应的最大空泡直径,故前后盘无法沟通。

4　结　论

通过对此系列水下射弹双圆盘空化器头型的通气实验研究,得到如下结论:

1) 此系列双圆盘空化器头型诱导生成通气超

空泡的过程中,空泡流型变化存在一个跃变。发生跃变时的临界通气流量系数值,受双圆盘空化器头型锥顶角的影响,与锥顶角的增长呈正相关趋势。

2) 此系列双圆盘空化器头型诱导生成的通气超空泡流型呈椭球形与单圆盘诱导生成的空泡流型相似,且因重力影响空泡尾部流型具有一定的不对称性。

3) 此系列双圆盘空化器头型的诱导的空化流型存在前盘优先和后盘优先2种状态,此二者的过渡发生在双圆盘空化器锥顶角55°附近;且对于通气超空泡的形成和发展前后盘间存在相互抑制的现象。

4) 此系列双圆盘空化器诱导生成的空泡形态特征量随通气流量系数的增加存在一个上限值,前盘优先状态下约为0.2,后盘优先状态下约为0.12。

参考文献:

[1] 姚忠,王瑞,徐保成,等. 超空泡射炮武器应用现状研究[J]. 火炮发射与控制学报,2017,38(3):92-97
YAO Zhong, WANG Rui, XU Baocheng, et al. Research on Current Application State of Supercavitation Projectile Artillery Weapons[J].Journal of Gun Launch & Control, 2017,38(3):92-97 (in Chinese)

[2] 张宇文,袁绪龙,邓飞. 超空泡航行体流体动力学[M]. 北京: 国防工业出版社,2014:34-40
ZHANG Yuwen, YUAN Xulong, DENG Fei. Fluid Dynamics of Supercavitating Underwater Vehicles[M]. Beijing, National Defense Industry Press,2014: 34-40 (in Chinese)

[3] 贾力平,于开平,张嘉钟,等. 空化器参数对超空泡形成和发展的影响[J]. 力学学报,2007(3):210-215
JIA Liping, YU Kaiping, ZHANG Jiazhong, et al. Influence of Cavitator Parameters on Formation and Development of Supercavity[J]. Chinese Journal of Theortical and Applied Mechanics,2007(3):210-215 (in Chinese)

[4] 贾力平,张嘉钟,魏英杰,等. 空化器参数对通气超空泡生成影响的实验研究[J]. 船舶力学 2007,11(5):171-178
JIA Liping, ZHANG Jiazhong, WEI Yingjie, et al. Experimental Investigation of Cavitator Geometrical Parameters Effecting on Development of Ventilated Supercavity[J]. Journal of Ship Mechanics, 2007,11(5): 171-178 (in Chinese)

[5] 栗夫园,党建军. 带翼锥形空化器的流体动力特性分析[J]. 鱼雷技术,2016,24(3):172-177
LI Fuyuan, DANG Jianjun. Hydrodynamic Characteristics of Conical Cavitator with Fins[J]. Torpedo Technology, 2016,24(3):172-177 (in Chinese)

[6] 栗夫园,党建军,张宇文. 锥形空化器的流体动力特性及其影响因素[J]. 上海交通大学学报,2016,50(2):246-250
LI Fuyuan, DANG Jianjun, ZHANG Yuwen. Influencing Factors and Characteristics of Hydrodynamic of Conical Cavitator[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016,50(2):246-250 (in Chinese)

[7] MENG Qingchang, ZHANG Zhihong, LIU Jubin. Numerical Calculation of Supercavitating Flows over the Disk Cavitator of a Subsonic Underwater Projectile[J]. Journal of Marine Science and Application,2015,14:283-289

[8] 张木,谭俊杰,易文俊,等. 空化器参数对超空泡初生位置影响大涡模拟[J]. 弹道学报,2016,28(1):87-91
ZHANG Mu, TAN Junjie, YI Wenjun, et al. Large Eddy Simulation Analysis on Effect of Cavitator Parameter on Supercavity Primary Position[J]. Journal of Ballistics,2016,28(1):87-91 (in Chinese)

[9] 方城林,魏英杰,王聪,等. 不同头型高速射弹垂直入水数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(10):77-82
FANG Chenglin, WEI Yingjie, WANG Cong, et al. Numerical Simulation of Vertical High-Speed Water Entry Process of Projectiles with Different Heads[J]. Journal of Harbin Insitute of Technology,2016,48(10):77-82 (in Chinese)

[10] 路丽睿,魏英杰,王聪,等. 不同头型射弹低速倾斜入水空泡及弹道特性试验研究[J]. 兵工学报,2018,39(7):1364-1371
LU Lirui, WEI Yingjie, WANG Cong, et al. Experimental Investigation into the Cavity and Ballistic Characteristics of Low-Speed Oblique Water Entry of Revolution Body[J]. Acta Armamentari,2018,39(7):1364-1371 (in Chinese)

[11] SAVCHENKO Y N. Control of Supercavitation Flow and Stability of Supercavitating Motion of Bodies[C]//The RTO/AVT Lectures Series on Supercavitating Flows, Ottawa, Canada, 2002

[12] 胡晓,郜冶,彭辉,等. 可变空化器诱导超空泡形态特征的数值研究[J]. 水动力学研究与进展,2017,32(2):203-212
HU Xiao, GAO Ye, PENG Hui, et al. Numerical Research on Shape of Supercavity Induced by the Variable Cavitator[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2017,32(2):203-212 (in Chinese)

[13] 魏英杰,何乾坤,王聪,等. 亚音速超空泡射弹尾拍动力学响应分析[J]. 振动与冲击,2012,31(18):67-72

WEI Yingjie, HE Qiankun, WANG Cong, et al. Impact Dynamic Responses of a Supercavitating Projectile in Subsonic Compressible Fluid Flow[J]. Journal of Vibration and Shock,2012,31(18):67-72 (in Chinese)

[14] 杨武刚,张宇文,邓飞,等. 通气流量对超空泡外形特征的影响实验研究[J]. 西北工业学报,2007,25(3):358-362
YANG Wugang, ZHANG Yuwen, DENG Fei, et al. Exploring Experimentally Effect of Gas Entrainment Rate on Geometrical Shape of Supercavity[J].Journal of Northwestern Polytechnical University,2007,25(3):358-362 (in Chinese)

[15] SAVCHENKO Y N. Supercavitation Problems and Perspectives[C]//Fourth International Symposium on Cavitation, California Institute of Technology, 2001

Experimental Study on Morphological Characteristics of Ventilated Supercavity of Double Disc Cavitator Projectile

DENG Fei, XIONG Wei, ZHOU Jianglei, ZHENG Dandan,
SU Xiaoyang, TANG Yong

(School of Marine Science and Technology ,Northwestern Polytechnical University, Xi′an 710072,China)

Abstract: Based on the principle of independence of cavity sections expansion, a double disc cavitator for underwater projectiles is proposed in this paper.The high-speed water tunnel experiment is carried out to study the generation and morphological characteristics of the ventilated supercavity which generated by this series of double disc cavitator.The experiment observed the ventilated supercavity morphology under the different cone angles by changing the ventilation flow coefficient.The experimental results show that there are two kinds of cavitation states: the front disc preferential cavitation and the rear disc preferential cavitation. The transition between these two states occur at a cone angle about 55°.The value of the critical ventilation flow coefficient when generating stable ventilation supercavity has a positive correlation with the cone angle.The front disc and the rear disc of the cavitator have mutual inhibitory effect on the production of ventilated supercavities.And the morphological characteristics of ventilated supercavity do not increase with the increasing of ventilation flow coefficient, but there is an upper limit value of ventilation flow coefficient.

Keywords: projectile; double disc cavitator; ventilated supercavity; ventilation flow coefficient; morphological characteristics of supercavity

© 2019 Journal of Northwestern Polytechnical University.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.