

【引用格式】姚忠, 祁晓斌, 夏方超, 等. 空化器绕射弹构型空化流动特性研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2025, 8(1): 54-60.

空化器绕射弹构型空化流动特性研究

姚忠, 祁晓斌*, 夏方超, 郭养宁

(西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099)

摘要 为研究射弹头型优化问题, 通过选取倒梯台型、圆球型及圆柱型的空化器构型, 针对不同空化器构型的空化绕流进行数值模拟。结果表明: 同一空化数下, 倒梯台型空化器产生的空穴尺度最大, 更易于空化的生成, 圆柱型空化器次之, 半球形空化器不易于产生空化。湍动能与空泡的生成息息相关, 倒梯台型空化器附近的湍动能最大, 其空泡尺度也最大。倒梯台型空化器比例对绕射弹高速空化流动影响显著, 随着空化器直径比例加大, 空泡厚度加大, 但亦导致航行阻力系数明显增大。综合来看, 倒梯台型空化器更易于空化的生成, 可以为超空泡射弹优选设计方案提供支撑。

关键词 超空泡射弹; 倒梯台空化器; 空化绕流; 空泡形态

中图分类号 TJ610.1 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2025)01-0054-07

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2025.01.007

Study on Cavitation Flow Characteristics of Cavitator around Projectile Configuration

YAO Zhong, QI Xiaobin*, XIA Fangchao, GUO Yangning

(Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xianyang 712099, China)

Abstract In order to optimize the projectile head shape, numerical simulations of the cavitation flow field of different cavitator configurations, including inverted cone-shaped, hemispherical, and cylindrical are conducted. The results indicate that under the same cavitation number, the inverted trapezium cavitator produces the largest cavitation profile and is more prone to cavitation generation. Cylindrical cavitator comes in second place, while hemispherical cavitator is less prone to cavitation. The turbulent kinetic energy is closely related to the generation of cavities, and the turbulent kinetic energy is highest near the inverted trapezium cavitator, so its cavity size is also the largest. The diameter ratio between the smaller and larger bottom surfaces of the inverted trapezium cavitator has a significant impact on the high-speed cavitation flow around the projectile. As this ratio increases, the thickness of the cavity increases, but it also leads to a significant increase in the navigation resistance coefficient. Overall, the inverted cone-shaped cavitator is easier to generate cavitation and can provide support for the optimal design scheme of supercavitating projectiles.

Key words supercavitation projectile; inverted trapezium cavitator; cavitating flow field; cavity shape

收稿日期: 2024-10-31

作者简介: 姚忠 (1965-), 男, 硕士, 研究员, 主要从事超空泡射弹技术研究。

*通信作者: 祁晓斌 (1988-), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事跨介质高速水动力学研究。

基金项目: 陕西省自然科学基础研究计划资助项目“高速射弹异步并联入水空化流动与干扰特性研究”(2024JC-YBQN-0441)。

0 引言

高速射弹在水下航行时, 其表面局部的压力值低于饱和蒸汽压力值时, 周围液体将发生汽化, 并逐步汇合形成空腔, 该现象称为空化^[1]。头型空化器^[2]能够诱导和促进空化的发生, 在运动体空泡生成过程中起着关键的作用。因此, 开展空化器构型的空化流动特性研究具有重要的工程(应用)价值^[3]。

诸多研究学者针对绕空化器回转体空化流动现象开展了广泛而细致的研究工作。ARAKERI等^[4-5]开展了圆盘和半球形等空化器绕回转体空化流动的实验研究, 分析了有无黏性时的流动分离特性及对初始空化的影响。LMDGREN等^[6]和JOHNSSON^[7]对绕回转体初始空化流动进行了实验研究, 观测到“游离态空泡团”和“‘指状’附着空穴”2种不同的初生空化形态, 并提出绕流运动中产生边界层分离是形成该现象的原因。HU等^[8]和胡常莉等^[9]利用高速影像实验测试技术对带有平头和锥头外形空化器回转体的初生空化流动进行研究, 研究发现初始空化均发生于圆锥-圆柱结合处的分离涡区域内, 且平头回转体初生空化位置距离肩部、圆柱段均较远。王复峰等^[10]采用试验和数值模拟的方法开展了不同尺度空化器回转体的空化流动研究。研究发现: 空化器尺度越大越有利于自然超空化的产生, 且有利于空泡的发展; 减小空化器尺度生成的通气空泡长度反而增加, 且容易达到稳定的超空泡状态。刘影等^[11]采用高速摄影技术对绕空化器回转体通气空泡的流场结构进行了研究, 分析了通气率和空化器尺寸对通气空泡形态的影响。王瑞等^[12]采用人工通气方法在回转体周围形成超空化流动, 并研究了不同形状空化器对绕回转体超空泡特性的影响。研究发现, 不同外形空化器均能形成稳定透明的空泡, 同一种外形的空化器, 来流速度越高, 获得的空泡尺度越大。傅琳琅^[13]等针对平头回转体开展了不同粗糙带高度条件下初生空化流动特性的数值研究。结果表明: 增加粗糙带会改变初生空穴的分布规律和近

壁面的流场结构, 且增加适当高度的粗糙带能够抑制初生空化。张木等^[14]对不同空化器参数模型下超空泡流动进行数值模拟。研究表明: 超空泡初生位置随空化器直径的变化而发生改变; 圆盘空化器模型具有较优的超空泡生成能力, 其超空泡初生位置位于空化器顶端。胡俊等^[15]针对带有不同空化器头型的回转体模型, 通过数值模拟研究头型和肩部连接方式对初生空化数及空腔形态的影响。研究表明: 圆形和椭圆系列回转体头部越长, 锥形系列回转体头部越短, 该空化流场的初生空化数越小。邓飞等^[16]通过高速水洞实验对双圆盘空化器构型的空泡生成与发展过程进行研究。结果表明: 双圆盘空化器诱导生成通气超空泡存在2种空化状态特征“前盘优先和后盘优先”, 且先后位置处的圆盘对空泡的生成具有相互抑制作用。

由上述文献可以看出: 目前主要以圆盘型、圆球型以及圆锥形等空化器构型的绕流空化特性进行了大量的研究, 对于倒梯台型空化器的空化流动机理的研究鲜有文献报道。

本文以圆盘型、圆球型为基准参考模型, 应用ANSYS Fluent16.0软件建立数值仿真方法并开展数值模拟研究, 重点分析倒梯台型空化器构型的空化绕流特性, 以期为超空泡射弹空化器头型优化设计与分析提供参考。

1 数值计算方法

1.1 控制方程

对于牛顿流体, 不考虑质量力和热量传输简化雷诺时均N-S方程在笛卡尔坐标系中的方程如下所示:

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

$$\frac{\partial(\rho_m u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu_m + \mu_T)(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij})] \quad (2)$$

$$\rho_m = \rho_l \alpha_l + \rho_v \alpha_v \quad (3)$$

$$\mu_m = \mu_l \alpha_l + \mu_v \alpha_v \quad (4)$$

式中: ρ_m 为水、汽混合物密度; ρ_l 为水相的密度, ρ_v 为汽相的密度; α_v 为蒸汽体积分数; α_l 为水相体积分数; u 为水、汽混合物速度; p 为水、汽混合物压力; μ_m 为水、汽混合物层流黏性; μ_l 和 μ_v 分别为水相、蒸汽相动力黏性; μ_t 为湍流黏性。下标 i, j, k 分别为笛卡尔坐标系的 3 个坐标轴方向。

1.2 空化模型

采用 Zwart 空化模型, 由简化的 Rayleigh-Plesset 推导获得, 它不考虑空泡半径的二阶导数和泡与泡之间的相互作用及热力学效应。

$$\frac{\partial \rho_l \alpha_l}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_l \alpha_l u_j)}{\partial x_j} = \dot{m}^+ + \dot{m}^- \quad (5)$$

$$\dot{m}^- = -C_{\text{dest}} \frac{3\alpha_{\text{nuc}}(1-\alpha_v)\rho_v}{R_B} \sqrt{\left(\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l}\right)}, p < p_v \quad (6)$$

$$\dot{m}^+ = C_{\text{prod}} \frac{3\alpha_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\left(\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l}\right)}, p > p_v \quad (7)$$

式中: α_{nuc} 为空化气核的体积分数; R_B 为空泡半径; p_v 为饱和蒸汽压力; p 为当地压力; C_{dest} 为水相蒸发项的经验常数; C_{prod} 为水蒸汽凝结项的经验常数。取值分别为 $\alpha_{\text{nuc}} = 5 \times 10^{-4}$, $R_B = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$, $C_{\text{dest}} = 50$, $C_{\text{prod}} = 0.01$ 。

1.3 湍流模型

湍流模型采用由 Menter 提出的 $k-\omega$ SST 湍流模型^[17], 在近壁面使用 $k-\omega$ 模型, 在远离壁面使用 $k-\epsilon$ 模型, 能较好地捕捉非定常流动多尺度的流场结构。

$$\frac{\partial(\rho_m k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m U_j k)}{\partial x_j} = P_k - D_k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho_m \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m U_j \omega)}{\partial x_j} = C_\omega P_\omega - \beta_\omega \rho_m \omega^2 +$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2\rho_m (1-F_1) \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (9)$$

涡粘系数由下式确定:

$$\mu_t = \frac{\rho a_l k}{\max(a_l \omega; S F_2)} \quad (10)$$

式中: P_k 、 P_ω 为湍流生成项; D_k 为湍流耗散项; F_1 、 F_2 为混合函数; S 为剪应力张量的常数项。

2 计算域与网格划分

2.1 计算对象

针对带有圆柱头型、圆球头型和倒梯台头型这 3 种头型的射弹主体回转体模型开展研究, 如图 1 所示。其中, 回转体为 2 段锥加圆柱相结合的模型, 锥段尺度与射弹原型保持一致, 以此保证空化流动的相似性。模型最大直径 D 为 20 mm, 长径比 $L/D=7.5$, 第 1 段锥最大直径 D_1 为 $0.6D$; 空化器与回转体通过螺纹连接, 空化器头型的特征尺寸 D_n 为 6 mm。

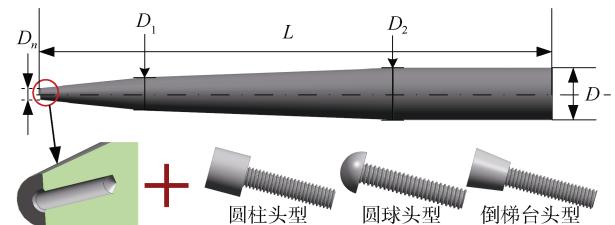


图 1 模型示意图
Fig. 1 Model diagram

2.2 网格及边界条件设置

空化数根据实验中流动条件确定, 空化数分别定义如下:

$$\sigma = \frac{(p_\infty - p_v)}{0.5 \rho_l U_t^2} \quad (11)$$

式中: U_t^2 为流场入口平均速度; p_∞ 为远场处静压强; p_v 为饱和蒸汽压; ρ_l 为水相密度。根据空化数 σ 的数值来调整入口处的静压强, 获得不同空化数下的空化流场特性。

计算采用的流体计算域尺寸取 $L_{\text{zone}} \times W_{\text{zone}} \times H_{\text{zone}} = 700 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 190 \text{ mm}$ 。其中, 主体模型前端面距离计算域左侧为 $L_{\text{Left}} = 1.5L$; 主体模型尾端面距计算域右侧为 $L_{\text{Right}} = 1.875L$ 。

图 2 给出了计算域以边界条件设置以及网格划分情况。计算域左侧边界设置为速度入口条件, 速度为 9 m/s, 设置入口湍流强度为 5%; 计算域右侧边界设置为压力出口条件, 由试验空化数推算获得; 其它计算域边界均设置为无滑移壁面条件。三维计算流域采用全结构化网格, 为更好的提高网格质量, 对主体模型切块采用多层 O-Block。为了更好地预测弹身周围空化流动, 在弹身附近进行了网格加密。

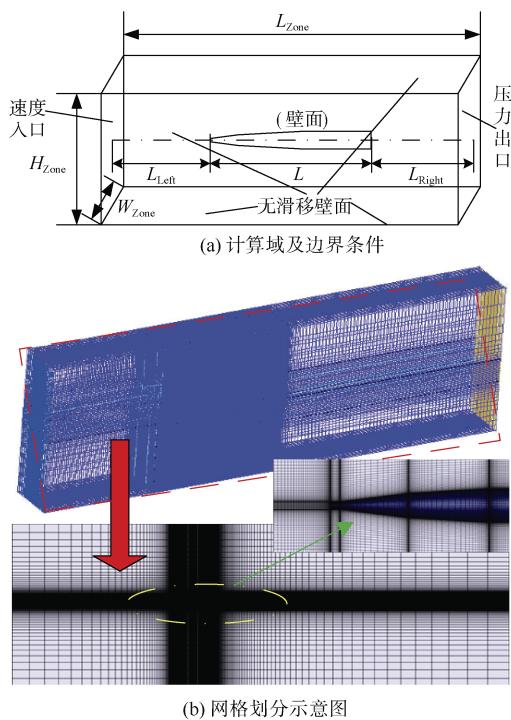


图 2 边界条件及网格设置

Fig. 2 Boundary conditions and grid settings

3 数值计算结果验证及分析

3.1 数值方法验证

3.1.1 网格无关性验证

为了校验网格对计算结果影响,采用圆柱型空化器分别开展了稀疏网格(45万)、标准网格(110万)、加密网格(175万)3种不同网格数量在空化数 $\sigma=0.055$ 时空泡形态数值仿真。对空泡轮廓提取时^[17],以50%的水相体积分数作为空泡边界,以减少提取误差。基于该方法,获得的空泡轮廓对比如图3所示,空泡最大直径与空泡长度的结果对比如表1所示。

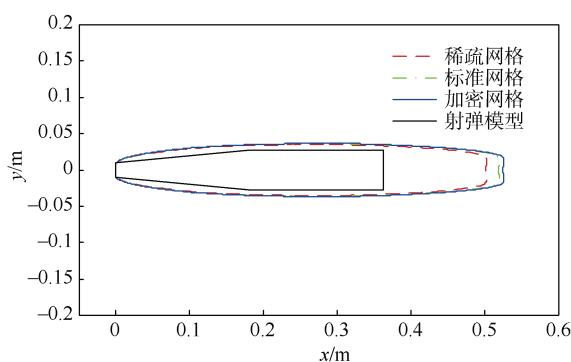


图 3 不同网格数量的空泡轮廓

Fig. 3 Cavity outline under different grid quantities

表 1 不同网格数量下空泡无量纲参数
Table 1 Dimensionless parameters of cavities under different grid quantities

序号	网格类型	D_c/D_n	L_c/D_n
1	稀疏网格	3.694	28.526
2	中等网格	3.824	29.605
3	精细网格	3.853	29.746

结合表1和图3可以看出:使用粗糙网格计算所得到的空泡轮廓尺寸明显小于其它2种网格的计算结果,而采用中等网格和精细网格的计算所得空泡轮廓则基本重合。为了平衡计算的经济性,本文采用标准网格(110万)作为后续计算工况的网格。

3.1.2 水洞试验验证

通过空化器水洞实验来校验本文建立数值计算方法的可靠性。图4给出空化数 $\sigma=0.038$ 时实验空泡与仿真空泡轮廓的对比结果,并提取了空泡轮廓最大直径和长度无量纲值的数据汇总见表2。结合图4和表2可以看出,仿真计算所得的空泡轮廓已基本与实验的空泡轮廓一致,仿真结果相对实验结果的误差均在10%以内,证明本文所采用的数值计算方法能在可接受的误差范围内模拟真实情况中的空泡轮廓。



图 4 数值仿真空泡与实验结果对比

Fig. 4 Comparison of cavities between numerical simulation and experimental results

表 2 空泡轮廓无量纲参数对比
Table 2 Comparison of dimensionless parameters for cavity profile

类型	D_c/D_n	L_c/D_n
实验结果	4.15	29.826
仿真结果	3.75	27.833
相对误差/%	9.6	9.7

3.2 空化器外形对绕射弹初始空化流动的影响

研究认为低速机理实验中易于空化的弹型, 可为高速优选弹型提供依据^[18]。选取空化数 $\sigma=0.39$ 工况(与水洞试验工况对应)来分析空化器结构对绕射弹空穴尺度的影响。图 5 为灰度处理后的实验空化图像与数值三维空泡结果对比图, 图 6 为截面上体积分数云图及速度矢量图。可以得到: 在空泡尺度、头部流线等发展趋势上数值结果与实验拟合较好。

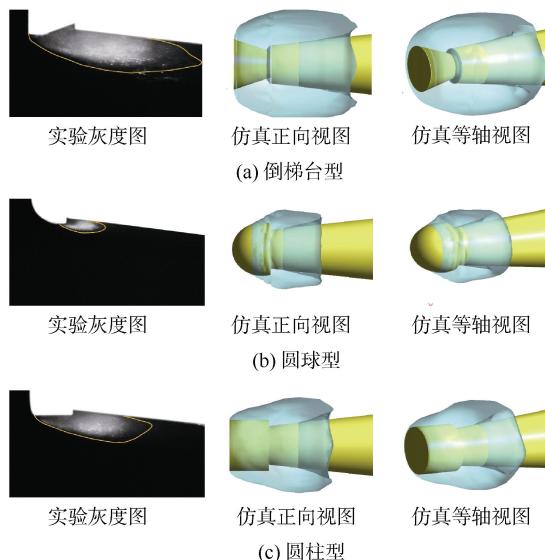


图 5 仿真和试验空泡对比结果

Fig. 5 Comparison between experimental gray scale images and numerical results

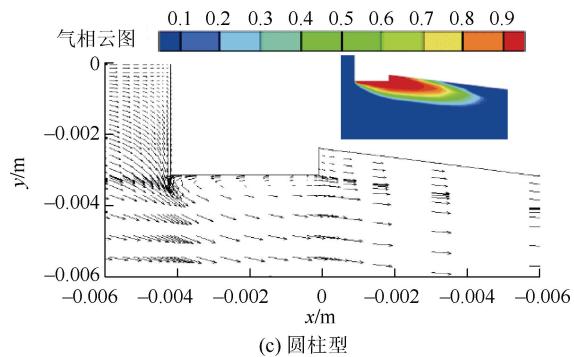
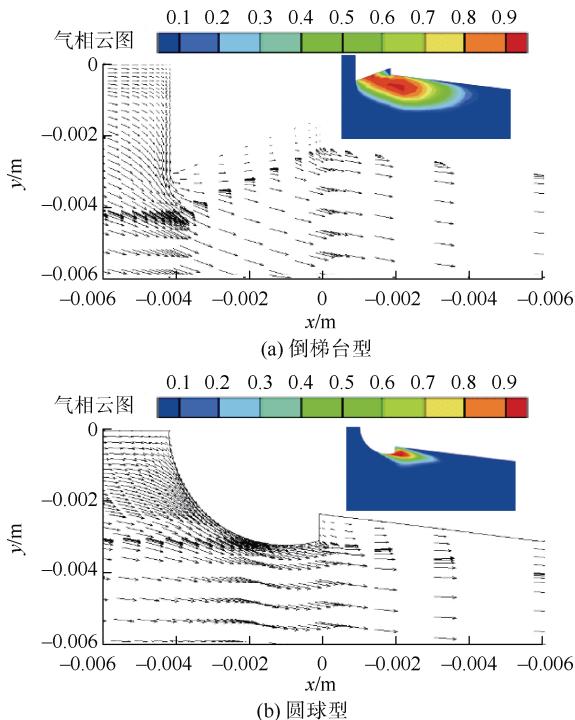


图 6 体积分数及速度矢量图

Fig. 6 Contour of vapor volume fraction and velocity vector diagram

研究中取空穴特征尺度 L_{\max}/D_{cav} 和 H_{\max}/D_{cav} (针对不同弹型, D_{cav} 分别为倒梯台型、圆球型、圆柱型等构型空化器直径)作为评判指标。取相同工况实验中 3 种射弹空穴尺度最为明显的结果进行对比分析。

图 7 为空泡特征尺度表征示意图表, 表 3 为 3 种空化器形成的空泡尺度对照表, 定量展示了空泡尺度的差异, 倒梯台型形成的空泡尺度更大。

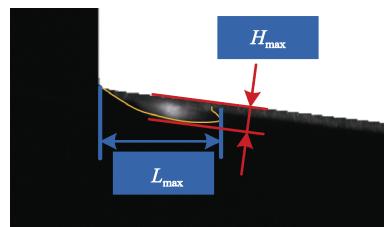


图 7 空泡特征参数表征示意图

Fig. 7 Schematic diagram of cavity characteristic parameters

表 3 空泡无量纲参数对比

Table 3 Dimensionless parameters comparison of cavities

空化器类型	L_{\max}/D_{CAV}	H_{\max}/D_{CAV}
倒梯台型	3.452	0.786
圆球型	0.738	0.220
圆柱型	2.185	0.538

图 8 为 3 种空化器结果湍动能对比, 湍动能与空穴的生成息息相关, 倒梯台型空化器附近的湍动能最大, 空穴尺度也最大。半球形空化器的湍动能最小, 周围包裹的空穴无论泡径还是泡长都是最小的。综合来看, 倒体形空化器更易于空化的生成, 可以作为优选的设计方案。

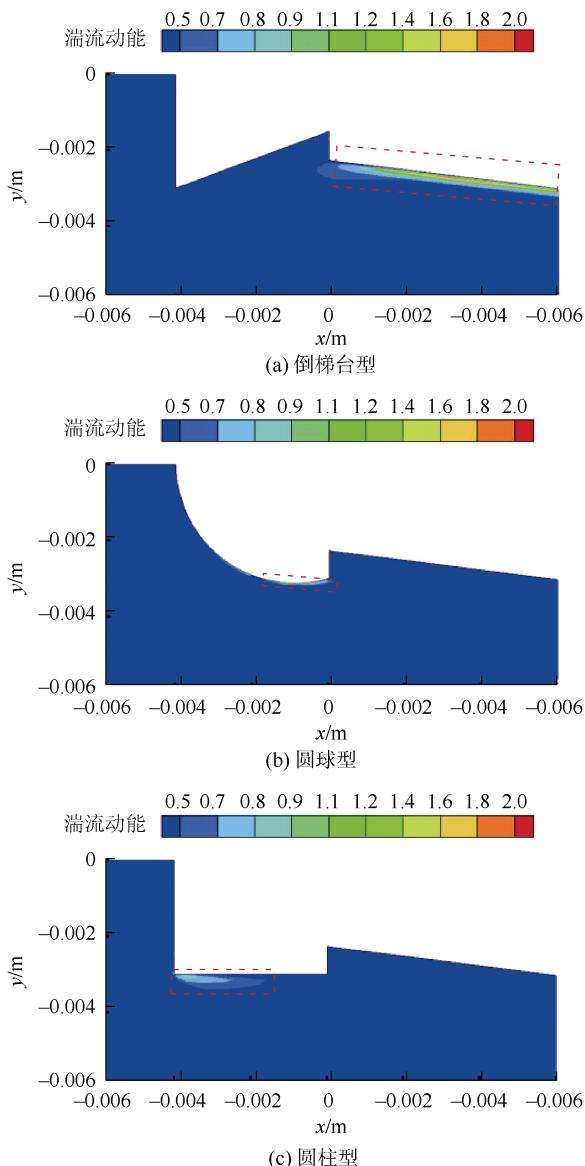


图 8 湍流动能对比图

Fig. 8 Comparison of turbulent kinetic energy

3.3 倒梯台构型的面积比对绕流特性的影响

倒梯台型的头型在相同空化数下能够更易于空化的生成与发展,当环境温度和压强一定时,持续降低空化数意味着逐渐增加射弹的航行速度,可以认为在极低空化数下倒梯台型空化器有着相同的作用。取倒梯台型前后底部直径比为 S ,则 S 分别为 4:3、5:3 和 6:3。3 种不同尺寸倒梯台型空化器的空泡形态及尾部空泡如图 9 所示,空泡完全发展后形成完全包裹弹身的超空泡,其中随着空化器直径比例增大,弹体头部空泡直径增加。

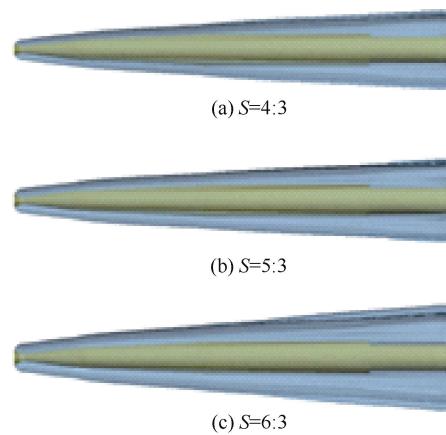


图 9 空泡形态

Fig. 9 Cavity shapes

以水蒸气体积分数 50% 处作为空泡边界^[19],提取 XY 截面上不同直径空化器的超空泡轮廓曲线如图 10 所示:随着 3 种空化器头部直径比例逐渐增大,超空泡尺寸逐渐增大,空泡边界逐渐远离弹身。 $S=4:3$ 、 $S=5:3$ 这 2 种空化器在弹身中部空泡大小区域近乎一致。 $S=6:3$ 与以上 2 种空化器相比,空泡轮廓径向直径有显著增大。

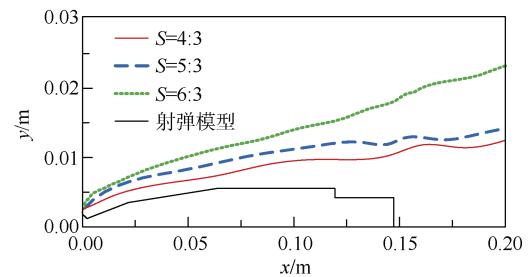


图 10 XY 截面超空泡轮廓曲线

Fig. 10 Outline of cavities on XY section

对比不同空化器作用下的阻力系数如表 4 所示,随着空化器直径加大,航行阻力系数明显增大。因此,在设计空化器结构时,要在保证满足有完整超空泡的前提下尽量减小空化器直径,以达到同时满足增强航行稳定性的同时减小航行阻力。

表 4 倒梯台型空化器阻力系数对照表

Table 4 Comparison of resistance coefficients for inverted trapezium cavitators

空化器尺寸类型	阻力系数
$S=4:3$	0.101
$S=5:3$	0.158
$S=6:3$	0.214

4 结束语

为研究射弹头型优化问题,设计了倒梯台型、半球形和圆柱型3种空化器结构,并采用实验研究与数值仿真相结合的方法,分析对比了不同空化器对低速以及高速可压缩流场的影响,得到优选空化器结构。主要结论如下:

1) 设计了倒梯台型、半球型及圆柱型3种不同空化器,在相同工况下,随着空化器直径的加大,射弹头部长身的空穴尺度明显加大;倒梯台型空化器产生的空穴尺度最大,更易于空化的生成,圆柱型空化器次之,半球形空化器不易于产生空化。

2) 在空泡结构方面,随着空化器直径比例加大,空泡厚度加大,射弹沾湿面积减少;在航行阻力方面,随着空化器直径比例加大,航行阻力系数明显增大。因此,设计空化器结构时,要在保证满足超空泡完全包裹的前提下尽量减小空化器直径比例,以达到同时满足增强航行稳定性的同时减小航行阻力。

参考文献

- [1] 季斌,程怀玉,黄彪,等.空化水动力学非定常特性研究进展及展望[J].力学进展,2019,49(1):428-479.
- [2] 黄彪,王国玉,胡常莉,等.绕回转体初生空化流场特性的实验及数值研究[J].工程力学,2012,29(6):320-331,325.
- [3] 祁晓斌,姚忠,李瑞杰,等.超空泡技术在反潜作战中的应用设想[J].数字海洋与水下攻防,2022,5(2):109-114.
- [4] ARAKERI V H. Viscous effects on the position of cavitation separation from smooth bodies[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1975, 68 (4): 779-799.
- [5] KAWANAMI Y, KATO H, YAMAUCHI H, et al. Mechanism and control of cloud cavitation[J]. Journal of Fluids Engineering, 1997, 119 (4): 788-794.
- [6] LMDGREN H, JOHMON C A. Cavitation inception on head forms ITTC comparative experiments[C]// The 11th International Towing Tank Conference. Tokyo: International Towing Tank Conference Association, 1966.
- [7] JOHNSSON C A. Cavitation inception on head forms further test[C]// The 12th International Towing Tank Conference. Rome: International Towing Tank Conference Association, 1969.
- [8] HU C L, WANG G Y, WANG X D, et al. Experimental investigation of inception cavitating flows around axisymmetric bodies with different headforms[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30 (7): 3193-3201.
- [9] 胡常莉,王国玉,陈广豪.绕平头回转体空穴的发展及脱落特性研究[J].兵工学报,2014,354(1):88-95.
- [10] 王复峰,王国玉,黄彪,等.通气空化多相流动特性的实验与数值研究[J].工程力学,2016(9):220-226,234.
- [11] 刘影,段忠平,刘涛涛,等.绕空化器回转体通气空泡流态特征实验研究[J].哈尔滨工程大学学报,2021,42(1):74-81.
- [12] 王瑞,党建军,姚忠.不同外形空化器绕回转体超空化特性试验研究[J].水下无人系统学报,2019,27(1):20-24.
- [13] 傅琳琅,胡常莉.粗糙带对绕平头回转体初生空化流动特性的影响研究[J].船舶力学,2022,26(8):1120-1128.
- [14] 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.
- [15] 胡俊,马亮,候夏伊.不同头型回转体空化现象的数值模拟研究[J].装备工程学报,2022,43(1):176-181.
- [16] 邓飞,熊伟,周江磊,等.双圆盘空化器射弹通气通气超空泡形态特性实验研究[J].西北工业大学学报,2019,37(1):93-99.
- [17] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32 (8): 1598-1605.
- [18] 黄闯,罗凯,党建军,等.流域径向尺度对自然超空泡的影响规律[J].西北工业大学学报,2015,33(6):936-941.
- [19] 李达钦.高速航行体可压缩超空泡流动数值计算[D].北京:北京理工大学,2016.

(责任编辑:曹晓霖)