

# 海流对出水空泡演化过程影响机理数值研究

刘元清, 崔 军

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 采用数值仿真手段, 重点针对海流对空泡演化过程的影响开展研究, 形成考虑海流影响的空泡多相流理论与数值计算方法, 分析了海流流向及流速影响, 获得了海流对空泡发展演化的作用机制及对航行体流体动力特征的影响规律。研究表明: 航向海流对溃灭阶段的空泡形态变化影响较为明显, 不同海流工况下, 泡内水、气分布有所不同, 高压产生次序及溃灭过程的流动结构变化也因此不同。横向海流作用下的空泡形态差别不大, 受到合成来流方向发生偏转的影响, 迎流面向横向来流方向偏斜, 造成空泡形状不对称。

**关键词:** 海流; 出水; 空泡

中图分类号: O352

文献标识码: A

文章编号: 2096-4080 (2020) 03-0055-07

## Numerical Study on Influence of Cavity Development Induced by Sea Route during Water Exit

LIU Yuanqing, CUI Jun

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** This article adopted the numerical method, coupling the VOF multiphase method, RNG  $k-\epsilon$  turbulence model and cavitation model to simulate the influence of cavity development induced by sea route exiting from water. The cavity unsteady developing differences induced by different sea route mode, including current velocity, direction, shear of current was analyzed. The hydrodynamics characteristics of flow field around the underwater vehicle under the interaction of cavity and sea route was presented in this paper. The results indicated that the cavity shape was dramatically impacted by heading sea routes than crossing way. The sea route parameters changed multiphase constituent which resulting in the cavity collapses pattern were variants when the heading routes act on. In addition, the cavity shape was asymmetrically influenced by the crossing sea routes.

**Key words:** Sea route; Water exit; Cavity

### 0 引言

海洋中的海水沿一定路径大规模流动形成了海流<sup>[1]</sup>, 海流流向、路径和速度均随时间和空间呈现出一定的变化。航行体水中及出水过程空泡形态受到海流作用, 会造成空泡不对称性发生变化, 从而影响航行体水中运动轨迹和出水姿态<sup>[1-3]</sup>,

是水下航行体研制过程中应重点关注的问题。

根据流动形式不同, 海流分为近海岸潮流与远海岸环流。近海岸潮流指与潮汐运动关联的海水运动, 有往复流和旋转流; 流速的大小和方向随时间存在周期性变化, 变化周期一般小于 12 h; 受近海岸地形影响, 不同深度的流速存在切变。远海岸环流指在海洋中相对稳定的流动; 流速和

收稿日期: 2020-04-16; 修订日期: 2020-05-06

作者简介: 刘元清 (1982-), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为水动力设计。E-mail: august0730@126.com

流切变一般较小,流动变化周期较长。海流参数一般包括:流动速度、流动方向、随时间的周期性及随空间的切变。

由于物理问题的复杂性,考虑浪流与非定常、非线性空泡流动耦合影响的航行体水下发射研究工作开展相对较少,水下航行体对海洋环境的适应性研究,主要集中在波浪对航行体流体动力特征及运动姿态的影响方面,多在流场边界采用 Stokes 非线性造波法开展波浪浪级、浪向及相位影响研究<sup>[4-5]</sup>。对于海流条件影响的分析较少,一般采用理论计算方法,通过施加随深度线性变化的水流速度,开展水下航行体出水姿态参数研究<sup>[6-8]</sup>,近年来,有学者采用机理模型实验及三维数值仿真的方法,研究横流对水下发射航行体流体动力的影响<sup>[9-10]</sup>。

本文采用数值仿真方法,重点针对海流对空泡演化过程的影响开展研究,形成考虑海流影响的空泡多相流理论与数值计算方法,分析了海流流向与流速的影响,获得了海流对空泡发展演化的作用机制及对航行体流体动力特征的影响规律。

## 1 考虑海流影响的航行体出水空泡多相流数学模型

### 1.1 物理模型及网格划分

建立计算模型时,需将航行体对流的速度  $V_{12}$  分解为航行体对地的速度  $V_{10}$  与地对流的速度  $V_{02}$  的矢量和

$$V_{12} = V_{10} + V_{02} \quad (1)$$

式中,海流运动即地对流的速度  $V_{02}$  通过设置计算域边界条件给定海流的流速、流向及沿深度方向的流切变,航行体平动即航行体对地的速度  $V_{10}$  则通过设置动框架沿流向、垂直方向机横向移动的速度给定,而航行体转动及俯仰平面内运动角速度则通过设置球面网格转动速度进行给定。

计算域网格划分如图 1 所示,整个流体计算域被划分为两部分,一部分为包裹航行体的球形区域,按照指定弹道进行法向运动;另一部分为远场流体域,计算过程中保持静止。两部分区域在内部边界相接,每迭代计算一步即在内部边界通过差值进行数据更新,算例网格总数约  $1.05 \times 10^6$ 。

### 1.2 多相流模型

为精确捕捉流动现象,采用 VOF 多相流模型,体积分数控制方程采用具有截面重构性质的

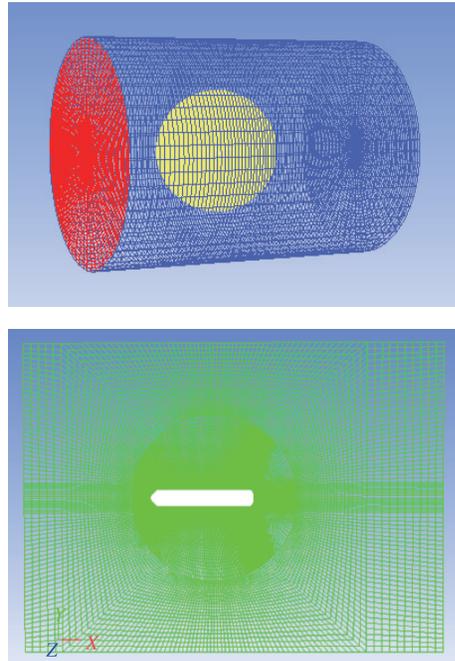


图 1 计算域网格划分

Fig. 1 Computational domain and local refined grid

PLIC 格式。针对水、蒸汽和空气等多相流场,认为不同组分的流体介质具有相同的运动速度,用同一速度、压力变量描述流场。航行体出水过程的流场满足质量守恒、动量守恒、能量守恒规律,可构筑如下控制方程。

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

式中,  $\rho$  为网格单元流体的平均密度,  $u_i$  为速度分量,其中坐标变量  $x_1 = x$ ,  $x_2 = y$ ,  $x_3 = z$ 。

(2) 动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

式中,  $g_i$  为重力分量,  $p$  为压力,  $\tau$  为黏性应力张量,对于牛顿流体来说,黏性应力张量为

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \quad (4)$$

式中,  $\mu$  为动力黏度系数。

(3) 能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + u_j (\tau_{ij})_{\text{eff}} \right] \quad (5)$$

式中,  $E$  为流体微团能量,  $T$  为温度,  $J$  为介质的扩散通量。

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i \cdot u_i}{2} \quad (6)$$

在以上各方程中，物性参数密度  $\rho$  和黏性系数  $\mu$  为各相体积分数  $\alpha$  的加权平均值

$$\rho = \rho_w(1 - \alpha_g - \alpha_v) + \rho_g\alpha_g + \rho_v\alpha_v \quad (7)$$

$$\mu = \mu_w(1 - \alpha_g - \alpha_v) + \mu_g\alpha_g + \mu_v\alpha_v \quad (8)$$

式中，下标  $w, g, v$  分别代表水、空气和蒸汽相。

### 1.3 空化模型

本文空化模型采用两相 Yuan 模型。该模型的输运源项基于微气泡的泡动力学模型，因此模型对压力的变化较为敏感，在非定常空泡流计算中具有良好表现，适用于出水中环境压力发生迅速变化空泡流的计算。同时，对于有清晰交界面的出水问题，VOF 算法在捕捉交界面时相对其他算法具有明显的优势，而 Yuan 模型空泡模型对 VOF 算法具有较好的适用性。

假定出水过程中，空泡与大气没有发生联通，因此认为在同一计算单元不会同时存在蒸汽和大气。空化只发生在水汽填充的区域，在  $\alpha_g$  不为零的单元，认为不会发生空化。采用的空化模型还是基于水汽两相模型，蒸汽相连续性方程的右端源相  $S_v$  的表达式为

$$S_v = \frac{d\alpha_v}{dt} \quad (9)$$

其中

$$\alpha_v = \frac{n_0 \cdot \frac{4}{3}\pi R_n^3}{1 + n_0 \cdot \frac{4}{3}\pi R_n^3} \quad (10)$$

式中  $n_0$  为单位体积水内含有的气核数，一般为给定常数，本文中为  $1.5 \times 10^{10}$ ； $R_n$  为气核半径。将式 (10) 代入 (9)，得到

$$S_v = \frac{(1 - \alpha_v)n_0}{1 + n_0 \cdot \frac{4}{3}\pi R_n^3} \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{4}{3}\pi R_n^3 \right) \quad (11)$$

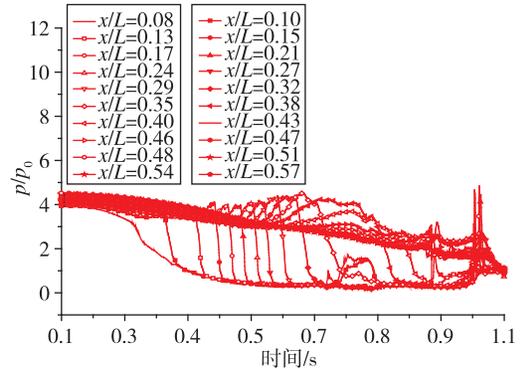
气核半径随时间的变化率  $dR_n/dt$  可以由 Rayleigh-Plesset 方程求解，但更方便的处理是采用下式直接给出

$$\frac{dR_n}{dt} = \frac{p - p_v}{|p - p_v|} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p - p_v|}{\rho_w}} \quad (12)$$

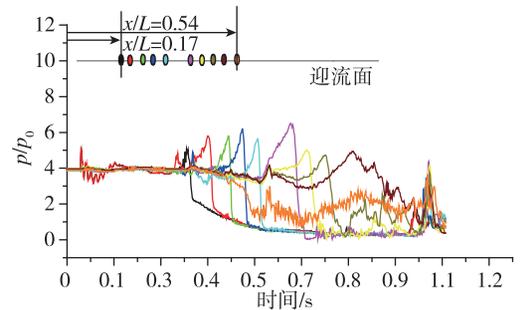
## 2 海流影响数值方法校验

为了验证文中所采用的计算方法与计算模型，采

用上述的计算方法对实验相同工况进行数值模拟研究，获取航行体表面压力系数分布、空泡压力与推进长度，并与实验数据进行对比分析，如图 2~4 所示。研究结果表明，本文采用的计算方法与数学模型不仅能够比较准确地预测空泡形态变化规律，而且对于空泡泡压的计算也可以取得令人满意的精度，因此，该数值方法与数学模型可以满足文中研究需要。



(a) 本文计算结果



(b) 实验测量结果

图 2 航行体表面压力对比

Fig. 2 Comparison of pressure distribution

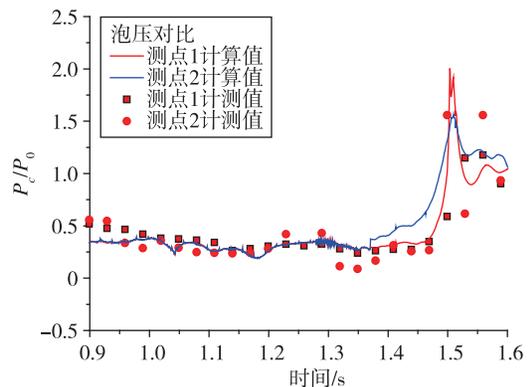


图 3 空泡内压力对比

Fig. 3 Comparison of predicted and measured ventilated cavity pressure

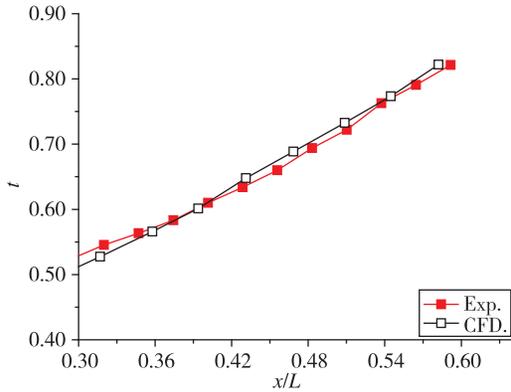


图4 空泡推进速度

Fig. 4 Comparison of predicted and measured ventilated cavity length

### 3 海流对出水空泡发展及流体动力特征影响分析

#### 3.1 考虑航行体俯仰运动下航向海流对出水空泡的影响研究

在航行过程中，航行体姿态是不断变化的，航行体的运动速度方向也在不断变化，因此造成航行体质心攻角的变化。而海流的空间变化及航行体的转动使不同位置的局部攻角也不相同。局部攻角可以由下式求得

$$\alpha = 90 - \vartheta - \arctan \frac{V_x - w \cdot r - V_s}{V_y} \quad (13)$$

式中， $V_s$  为海流速度， $V_x$  为航行体运动垂向速度，如果  $V_x$  按照 30 m/s 计算，由海流引起的局部攻角变化如表 1 所示，而流体与航行体运动的相对攻角是影响空泡在出水过程中发展规律的主要因素之一。

表 1 海流速度引起的相对攻角

Tab. 1 Attack angle induced by different sea route velocities

$V_s / (m/s)$	$\alpha_s / (^\circ)$
0	0
0.2	0.44
0.4	0.88
0.8	1.76
1	2.20
2	4.40
3	6.60

将海流参数（包括流速、流向）抽象为 5 种典型海流特征开展数值仿真计算，见表 2 和图 5。

表 2 海流速度的数学表达

Tab. 2 Calculation cases with different sea route mode

计算工况	海流特征	数学表达
工况 1	沿深度方向存在变斜率切变，且近水面存在较大流切变	—
工况 2	沿深度方向存在固定斜率切变，随深度变浅海流流速减小	$dV_s/dh = -0.1/s$
工况 3	沿深度方向存在固定斜率切变，随深度变浅海流流速增大	$dV_s/dh = 0.1/s$
工况 4	沿水深均匀分布	$V_s = 1.1 m/s$
工况 5	沿水深均匀分布	$V_s = 1.4 m/s$

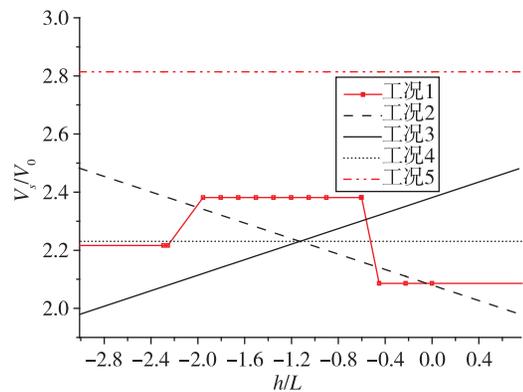


图 5 给定海流速度分布

Fig. 5 Sea route velocity distribution of different cases

通过提取并对比出水时刻各工况下迎流面空泡发展过程（见图 6），从空泡推进规律看，海流形式对空泡发展的影响不显著。海流流速增大，迎水面空泡泡长略短，背水面泡长略有增长。主要是因为各海流的差别较小，以水深 0 m 时的海流速度相比，前 4 种工况的差别不超过 0.2 m/s，其引起的攻角变化不超过  $0.5^\circ$ 。海流作用机制主

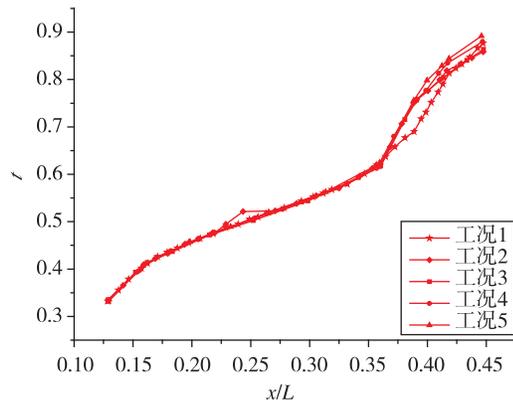


图 6 各工况迎流面空泡发展比较

Fig. 6 Comparison of predicted ventilated cavity length in different cases

要为海流叠加引起的局部攻角变化使得空泡不对称性加剧。

通过对航行体表面各压力监测点空泡溃灭峰值出现时间进行对比分析, 5 种工况迎流面沿航行体表面各测点的溃灭时间见图 7。从空泡溃灭特征看, 计算结果表现出一定的阶梯特征。从溃灭峰值时间来看, 工况 5 中的来流速度最大, 迎流面的空泡也相对更薄一些, 因此各截面溃灭出现的时间也相对更早。

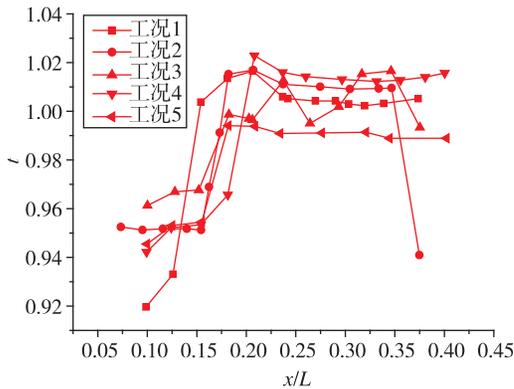


图 7 各工况迎流面测点溃灭时间  
Fig. 7 Comparison of cavity collapse time

出水时, 不同海流工况下空泡的形态见图 8。比较工况 4 与工况 5, 随海流速度增大, 迎流面的空泡厚度略薄。工况 4 中, 泡内回射水体更多地出现在背流面。

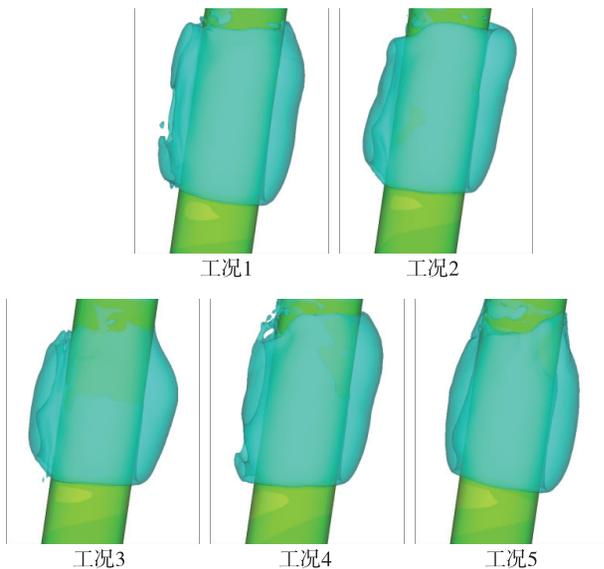
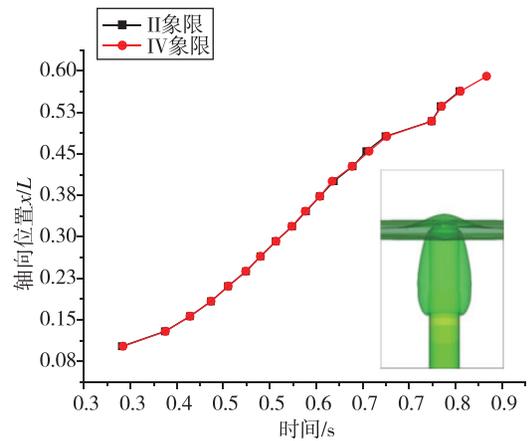


图 8 航向海流对空泡形态影响  
Fig. 8 Cavity shape impacted by different sea route mode in flow direction

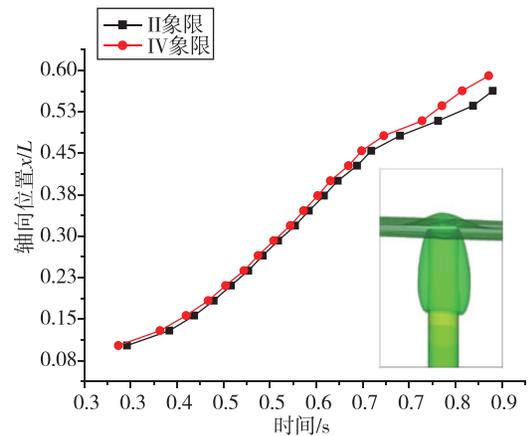
### 3.2 不同横向海流对出水空泡的影响研究

为研究不同横向来流速度对空泡形态的影响, 横流速度分别取 0, 0.25, 0.5, 0.75 m/s, 分别给出了不同横流条件下空泡形态变化及空泡泡长发展演化对比分析。

不同横向来流作用下的空泡形态差别不大, 随横向海流速度增加, 空泡对称性发生变化。受横向来流影响, 空泡沿横流方向由迎流面向背流面发生偏斜, 由图 9, 10 可以看出, 背流面空泡泡长较长、空泡较厚。通过对比空泡厚度最大横截面迎、背流面空泡形态可知, 来流对空泡的横向挤压作用是造成空泡横向偏转的主要原因。



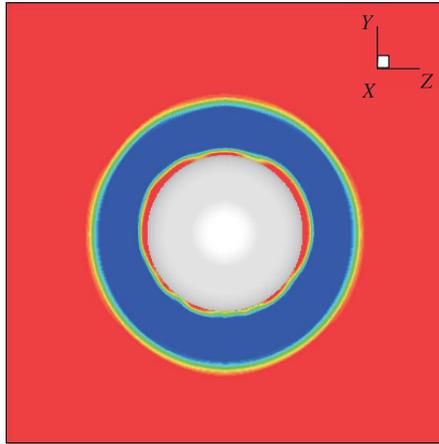
(a) 横向来流速度 (0 m/s)



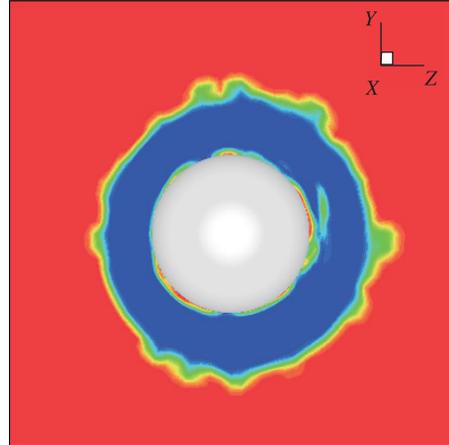
(b) 横向来流速度 (0.75 m/s)

图 9 某时刻不同横流速度下横向空泡形态对比 (视角为沿来流方向)

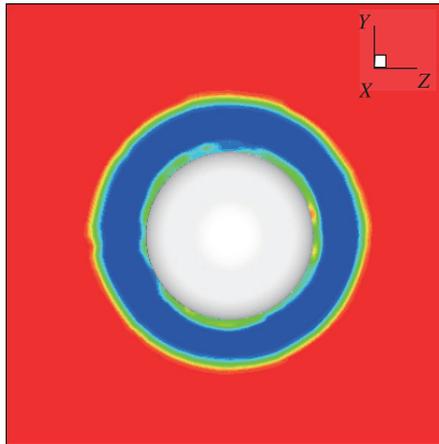
Fig. 9 Cavity shape impacted by different sea route velocity in cross direction



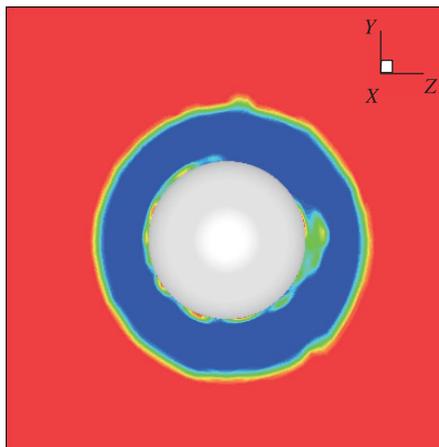
(a) 横向来流 0 m/s



(d) 横向来流 0.75 m/s



(b) 横向来流 0.25 m/s



(c) 横向来流 0.5 m/s

图 10 不同横向来流空泡最大横截面形状

Fig. 10 Cavity shape in cross-section impacted by different sea route velocity in cross direction

#### 4 结论

通过建立考虑海流影响的航行体垂直及航行体出水过程空泡多相流数值计算模型,得到海流对出水空泡演化过程的作用特点,对其流体动力特征进行深入分析,并研究流速、流向等重要海流参数对出水空泡演化过程的影响机理,并得到以下结论:

1) 在航行体带空泡出水过程中,海流的不同会影响航行体运动状态和姿态,因此,其直接和间接地影响肩部的局部攻角变化,从而影响空泡的发展过程。

2) 航向海流对溃灭阶段的空泡形态变化影响较为明显,不同的海流状态下,泡内水、气分布有所不同,高压产生次序及溃灭过程的流动结构变化也因此不同。

3) 不同横向来流作用下的空泡形态差别不大,受到合成来流的方向发生偏转的影响,迎流面向横向来流方向偏斜。

#### 参考文献

- [1] 唐一华.水下垂直发射航行体空泡流动研究[J].宇航总体技术,2018,2(1):12-20.
- [2] 夏国泽.船舶流体力学[M].武汉:华中科技大学出版社,2003.

- [3] 范凤桐. 鱼雷航行动力学[M]. 武汉: 海军工程学院, 1981.
- [4] Zwart P J, Gerber A G, Belamri T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics[C]. ICMF 2004 International Conference on Multiphase Flow, Yokohama, Japan, The Japanese Society for Multiphase Flow, 2004.
- [5] 朱坤, 陈焕龙, 刘乐华, 等. 波浪相位对航行体出水过程水动力特性的影响[J]. 兵工学报, 2014, 35(3): 355-361.
- [6] 方国强. 波浪和海流条件下潜射飞行器出水姿态参数研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2011(3): 13-15.
- [7] 施淑伟, 严卫生, 高剑, 等. 常值海流作用下的 AUV 水平面路径跟踪控制[J]. 兵工学报, 2010, 31(3): 375-379.
- [8] 曹子尧. 常值海流作用下多自主水下航行器编队控制[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(8): 79-83.
- [9] 蔺晓建. 横流对气幕发射影响的试验和数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [10] 邓佳. 导弹水下热发射多相流场与动力特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.

**引用格式:** 刘元清, 崔军. 海流对出水空泡演化过程影响机理数值研究[J]. 宇航总体技术, 2020, 4(3): 55-61.

**Citation:** Liu Y Q, Cui J. Numerical study on influence of cavity development induced by sea route during water exit [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(3): 55-61.