

文章编号: 1000-4750(2015)Suppl-0342-06

# 水下航行体变深度发射出筒空泡数值研究

闵景新, 李云波

(哈尔滨工程大学船舶工程学院, 黑龙江, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 采用数值方法对水下航行体带均压气体出筒过程进行数值模拟, 研究了发射筒内均压气体及发射深度对出筒空泡的影响。基于均值混合物多相流模型、气体状态方程、质量输运空泡模型和 RNG  $k-\varepsilon$  湍流方程, 并结合动网格技术, 实现了水下航行体带均压气体出筒过程数值求解。通过对典型弹体模型从不同深度发射出筒过程进行数值研究, 得到了出筒过程空泡形态特征和内部结构, 对比分析不同发射深度空泡尾部闭合时气体弹性系数的变化规律, 并与文献中理论分析结果进行了对比验证。研究结果表明: 均压气体将跟随航行体运动在航行体表面形成通气空泡, 气体的弹性系数将影响空泡内气体的脱落速度和空泡尾部闭合位置; 相同的弹射速度下, 发射深度越大, 空泡尾部闭合的越早。

**关键词:** 流体力学; 水下航行体; 数值模拟; 出筒; 空泡

**中图分类号:** O351.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.05.S003

## NUMERICAL SIMULATION OF TUBE-EXIT CAVITY OVER UNDERWATER PROJECTILE EJECTED FROM DIFFERENT DEPTHS

MIN Jing-xin, LI Yun-bo

(College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** The influence of ejection depth and air filled in the launch tube on a tube-exit cavity was researched by numerical simulation methods during projectile ejected underwater. The ejection process was simulated based on a homogeneous multiphase flow, ideal gas state equation, homogeneous equilibrium flow cavitation model, and RNG  $k-\varepsilon$  equation combined with the dynamic mesh. The shape characteristics and inner structure of a tube-exit cavity was studied by conducted simulation on a typical underwater projectile shape model. Four types of ejection depth was simulated, and the variation of the elasticity coefficient of gas, when the tube-exit cavity closed, was also analyzed and validated with the theoretical analysis result given in the literature. The numerical results show that the even pressure gas moves with the projectile and forms a ventilated cavity on the surface of the projectile. The elasticity coefficient of the gas has great influence on the leakage speed and close point of the cavity. The deeper of the ejection, the earlier cavity closed with the same ejecting speed.

**Key words:** fluid mechanics; underwater projectile; numerical simulation; tube-exit; cavity

水下航行体进行垂直弹射出筒时, 由于发射筒内均压气体(调节发射筒内与海水压强平衡的不可凝结气体)的泄出以及高速出筒引起的自然空泡效应, 其头部会附着气、汽、水三相混合空泡<sup>[1]</sup>。空泡内气体脱落速度与尾部闭合位置将直接影响泡内压力和空泡形态, 进而影响空泡进一步发展及出

水时溃灭载荷。因此, 认识出筒空泡内部组成结构, 分析发射深度对出筒空泡的影响, 预测空泡的大小和空泡尾部闭合位置, 将为进一步研究空泡发展与出水溃灭提供重要基础<sup>[2-3]</sup>。

在水下航行体出筒空泡方面, 早期主要采用实验方法进行研究。随着计算机技术的发展, 数值模

收稿日期: 2014-05-06; 修改日期: 2015-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179036, 51309060); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(HEUCFR1204)

通讯作者: 闵景新(1982—), 男, 江西人, 讲师, 博士, 主要从事气泡减阻多相流领域研究(E-mail: minjx@163.com)。

作者简介: 李云波(1963—), 女, 黑龙江人, 教授, 博士, 副院长, 主要从事船舶阻力和流体力学领域研究(E-mail: yunboz@163.com)。

拟在航行体水下发射研究中发挥的作用日益明显。文献[4-5]先后对出筒空泡进行了数值研究,但主要集中于出筒过程尾空泡的研究。刘筠乔等<sup>[6]</sup>基于 Mixture 多相流模型在没有考虑自然空化的情况下,对水下航行体出筒通气空泡流进行研究,但没有考虑发射筒内气体的影响;程载斌等<sup>[7]</sup>基于 LS-DYNA 对水下航行体带均压气体发射过程流固耦合进行了研究,分析了出筒过程航行体的流体动力,但是没有考虑自然空化的影响。可见,有关水下航行体带均压气体出筒空泡流方面有一些研究,但还处于起步阶段。

本文基于均质混合物多相流模型的有限体积法求解 RANS 方程,结合动网格技术,对水下垂直发射航行体带均压气体出筒过程的轴对称流场进行了数值模拟。数值研究了不同发射深度水下航行体带均压气体出筒空泡的演化和内部结构,分析了发射深度对气体弹性系数和空泡尾部闭合位置的影响。本文采用的数值模拟方法和结果为进一步研究空泡发展及出水溃灭提供基础。

## 1 计算模型

### 1.1 模型简化

为方便计算,计算模型作如下假设:1) 航行体带均压气体出筒过程涉及到燃气、蒸汽、空气、水以及结构等多相混合的复杂物理场,在研究均压气体对航行体前端空泡的影响时,因弹体和发射筒之间存在密封环,本文忽略了尾部燃气对前端空泡的影响,只考虑发射筒内均压气体、水及自然空化水蒸汽的相互作用;2) 发射筒前端薄膜在数值模拟时按一次性完全破裂处理;3) 发射筒内均压气体为理想气体;4) 假设水不可压,数学模型连续性方程中考虑了空化引起的汽、水质量输运效应;5) 因计算模型与区域具有轴对称性,计算过程采用轴对称模型;6) 不考虑弹射过程阻力影响,假定模拟弹为刚体运动,并以恒定速度运动;7) 忽略弹体与发射筒之间缝隙及适配器的影响;8) 通过调节发射环境压力的方式,实现发射深度的变化。

### 1.2 控制方程组

采用均质平衡流多相流模型,忽略两相界面之间的滑移现象,流场各相具有共同的压强和速度,因此计算过程只有混合物的 RANS 方程。混合物的连续性方程和动量方程可表示为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \left\{ (\mu + \mu_t) \left[ (\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{V} \mathbf{I} \right] \right\} \quad (2)$$

其中:  $P$  为混合物的压强;  $\rho$  为混合物的密度;  $\mathbf{V}$  为混合物速度矢量;  $\mu$  为混合物运动粘度;  $\mu_t$  为湍流粘度,由 RNG 湍流方程组封闭<sup>[8-9]</sup>。混合物密度定义为:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{f_v}{\rho_v} + \frac{f_g}{\rho_g} + \frac{f_{ncg}}{\rho_{ncg}} + \frac{1 - f_v - f_g - f_{ncg}}{\rho_l} \quad (3)$$

其中  $f_i = \alpha_i \rho_i / \rho_m$  ( $i = l, v, g, ncg$ ), 是水、水蒸汽、空气、水中不可凝结气核的质量分数,气核质量分数是很小量值,计算过程取为定值  $f_{ncg} = 1.5 \times 10^{-5}$ ;  $\rho_i$ 、 $\alpha_i$  ( $i = l, v, g, ncg$ ) 分别为各相的密度和体积分数。考虑空化质量输运后的汽、气相连续性方程为:

$$\frac{\partial(\rho f_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho f_v \mathbf{V}) = \frac{\sqrt{2\rho_l k}}{\lambda} (C_e \rho_v \sqrt{\max(p_v - p, 0)} f_l + C_c \rho_l \sqrt{\max(p - p_v, 0)} f_v) \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho f_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho f_g \mathbf{V}) = 0 \quad (5)$$

不可凝结气体与筒口均压气体满足理想气体状态方程:

$$\rho_{ncg} = \rho_g = \frac{W_g P}{RT} \quad (6)$$

计算时模型中经验系数  $C_e = 0.02$ ,  $C_c = 0.01$ ; 表面张力系数  $\lambda = 0.0717 \text{ N/m}$ 。

### 1.3 网格模型与边界条件设置

水下航行体外型受潜艇尺寸及发射容积的限制,为了提高水下航行体的射程、增强航行体的攻击效能,航行体弹头向短而钝、不带弹翼的小容旋成体方向发展。计算模型柱段直径为  $D_m$ , 头部直径  $D_m/3$ , 总长为  $L_m = 7D_m$ 。因弹体模型具有轴对称性,计算过程采用如图 1 所示的轴对称域流场进行计算。计算区域网格采用分块结构化网格,如图 2 所示,其中弹头部附近区域采用了 C 型网格,保证弹体头部边界局部网格的加密,这样既保证计算的收敛性,同时也可减小计算规模<sup>[10]</sup>。另外,考虑到动网格生长域与两相边界交叉或重合时会严重影响收敛性,为确保计算的可靠收敛,模型中采用了域动分层动网格技术,将由航行体运动所导致的网格生长和溃灭位置选择在远离弹体的压力出口附近<sup>[11]</sup>。

非稳态过程采用基于有限体积的 SIMPLEC 算法进行求解。动量方程采用二阶迎风格式,压力项

离散采用 PRESTO! 离散格式, 对流项采用 QUICK 离散格式, 湍流和耗散项则采用了二阶迎风格式。

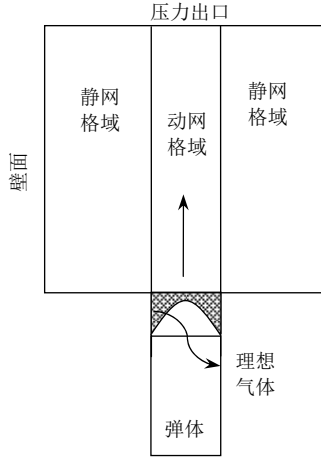


图 1 计算区域与模型

Fig.1 Computational zone and model

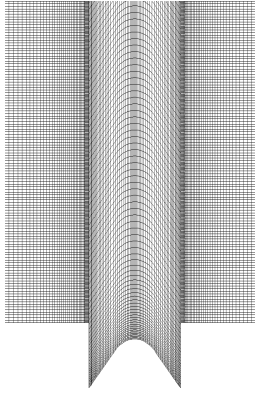


图 2 头部区域网格加密

Fig.2 Local mesh refinement in warhead region

## 2 计算结果与分析

### 2.1 出筒过程空泡形态与内部组成结构分析

涉及的无量纲参数为佛劳德数、自然空化数和无量纲时间分别定义为:

$$Fr = \frac{v_m}{\sqrt{gD_m}}, \quad \sigma_v = \frac{2(p - p_v)}{\rho v_m^2}, \quad \bar{t} = \frac{v_m t}{D_m} \quad (7)$$

其中:  $p$  是当地水深环境静压;  $p_v$  为饱和蒸汽压强;  $g$  为重力加速度;  $v_m$  是航行体运动速度。本文针对水下航行体以恒定速度从 4 种不同深度发射时出筒空泡的演化过程进行了数值研究, 对应的出筒佛劳德数为  $Fr=7.7$ , 发射自然空化数分别为  $\sigma_{v0}=0.57$ 、 $\sigma_{v0}=0.71$ 、 $\sigma_{v0}=0.86$  和  $\sigma_{v0}=1.0$ 。

$$\bar{V}_{cav} = \frac{4V_{cav}}{\pi D_m^2 L_m}, \quad \bar{\alpha}_g = \frac{\iiint \alpha_g dV}{V_{cav}}, \quad \bar{\alpha}_v = \frac{\iiint \alpha_v dV}{V_{cav}} \quad (8)$$

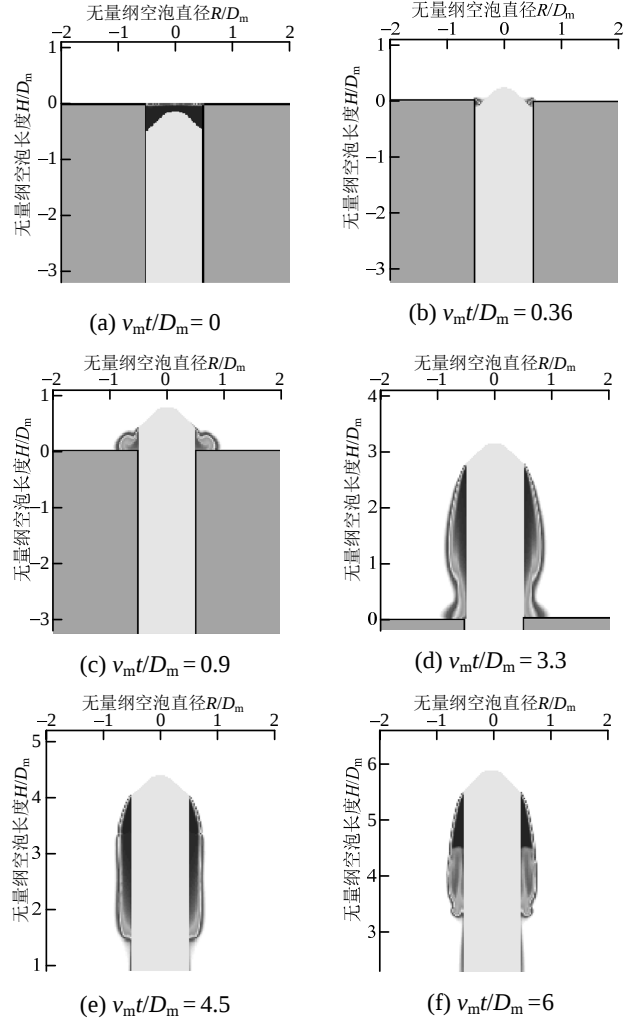


图 3 航行体出筒过程空泡生成发展过程 ( $\sigma_{v0} = 0.57$ )

Fig.3 Cavity formation and development process during ejection ( $\sigma_{v0} = 0.57$ )

图 3 为  $\sigma_{v0}=0.57$  发射工况, 出筒空泡的演化过程。从图 3 可以看出, 由于水的惯性阻滞作用, 发射筒前端的均压气体在向上运动航行体推动下压缩并向上运动, 筒口均压气体将受压而体积收缩(图 3(a)~图 3(b)); 随后均压气体挤压出筒, 惯性向四周膨胀, 径向膨胀的速度明显快于轴向膨胀速度, 并形成覆盖筒口的气泡(图 3(c)); 随着航行体向上运动, 弹体肩部压力因绕流作用而降低, 径向膨胀气泡中的气体流向航行体表面低压区<sup>[12]</sup>, 从而径向收缩、轴向拉长, 在弹体表面形成通气空泡(图 3(d)); 最后, 空泡尾部从线轴形逐渐收缩至断裂, 空泡尾部闭合, 向泡内通气将因空泡的尾部闭合而中止<sup>[13]</sup>, 闭合后空泡跟随航行体继续向水面运动(图 3(d)~图 3(f))。

其中  $\bar{V}_{cav}$  为实时无量纲空泡体积,  $V_{cav}$  为时空泡体积,  $\bar{\alpha}_g$  和  $\bar{\alpha}_v$  分别为空泡内实时气相与汽相

无量纲体积。为了便于分析,定义如下无量纲参数。

图4为水下航行体在4种发射空化数工况下,出筒过程空泡无量纲体积随无量纲时间的变化曲线。从图4可以看出,空泡的总体积均先压缩,然后膨胀脱落最后波动变化;空化数越大(发射深度越深),空泡第一次膨胀的越激烈,并且膨胀至最大体积越小,空泡第二次收缩的时间点也越提前;空化数 $\sigma_v = 1.0$ 时,空泡体积在出筒过程一直波动变化,而 $\sigma_v = 0.57$ 工况,空泡体积因自然空化产生,后期空泡体积迅速增大。

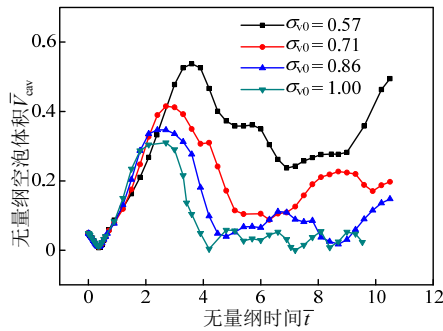
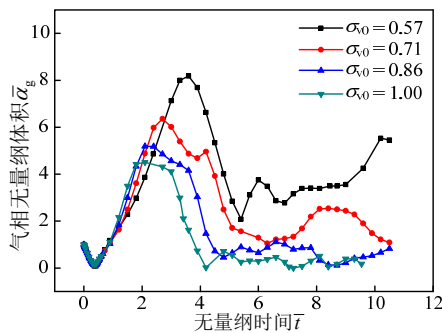
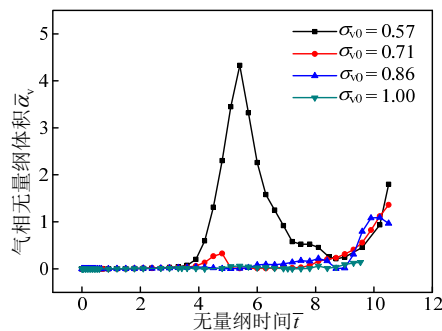


图4 空泡无量纲体积随无量纲时间变化曲线

Fig.4 Dimensionless bubble volume versus dimensionless time



(a) 气相无量纲体积随无量纲时间变化



(b) 汽相无量纲体积随无量纲时间变化

图5 无量纲气、汽相体积随无量纲时间变化曲线

Fig.5 Dimensionless gas phase and vapor phase volume versus dimensionless time

图5为出筒过程,空泡内气相和汽相无量纲体积随无量纲时间的变化曲线,从图5(a)可以看出出

筒空泡初始时主要是由均压气体组成,此时空化数比较大,并没有产生自然空化现象,均压气体先是压缩,随后迅速的膨胀,发射空化数越大,则环境压力越大,空泡内气相能膨胀到的最大体积也越小;经历一次压缩和膨胀后,工况1和工况2均产生明显的自然空化现象(如图5(b)所示);气相收缩最小值时,因自然空化所产生的汽相体积越大。同时可以发现,工况1与工况2因自然空化的产生,气相的体积波动衰减速度明显快于工况3和工况4;4个计算工况在最后计算时刻均产生了明显的自然空化现象。

## 2.2 出筒空泡闭合位置分析

水下航行体穿越筒口气水界面出筒时,发射筒内的均压气体跟随航行体运动,并在航行体的头部形成通气空泡;随着航行体离开筒口向水面运动,空泡内的气体因同时存在与海水流场掺混和空泡尾部泄漏,从而空泡内的气体质量将不断减小;如果出筒空泡因带入气体量过多而导致空泡失稳,空泡的漏气机理将发生重要变化,出现气体大面积同时脱落现象。

图6为4种发射工况下空泡内气体无量纲质量随无量纲时间变化曲线,其中 $m_g$ 和 $m_{g0}$ 分别为空泡内气体实时质量和初始时发射筒内均压气体的质量。从图6可看出,4种发射工况下,空泡内气体含量均有一个大面积脱落、空泡内气体质量急剧衰减的突变过程;此时,空泡尾部离开发射筒而闭合,随后空泡内的气体质量缓慢变化。同时,发射空化数对出筒空泡内气体尾部闭合时间点有影响,发射空化数越大,则空泡尾部闭合时间点相对越提前。对比图5(a)可以发现,尽管空泡内的气体因脱落而带走了大量的气体,但是空泡中气体体积并没有相同量级的减小,由于弹体表面压力的降低,模拟发射工况1空泡内气相体积甚至大大的增加了。

Paryshev 针对轴对称通气空泡理论和实验研究,指出通气空泡气体脱落及空泡稳定性与通入气体的弹性密切相关<sup>[14-15]</sup>。并指出通气空泡内气体的弹性和自然空化数 $\sigma_v$ 与通气空化数 $\sigma_g$ 关系,由于出筒时候均压气体被压缩出筒,可能存在零甚至负通气空化数,因此本文定义气体弹性系数 $\beta$ 为:

$$\beta = \frac{\sigma_g}{\sigma_v} \quad (9)$$

其中: $\sigma_g = 2(p_{\text{ref}} - p_g) / \rho v_m^2$ ,  $p_{\text{ref}}$ 为参考点压力,取为水平距离弹体头部与柱段连接处 $10 D_m$ 测点的

压强;  $p_g$  为通气空泡内压。Paryshev 通过理论分析和实验验证指出: 当  $\beta \geq 0.378$  时, 空泡是稳定的; 当  $\beta < 0.378$  时, 空泡是将失去稳定而出现泡内气体的大面积脱落。

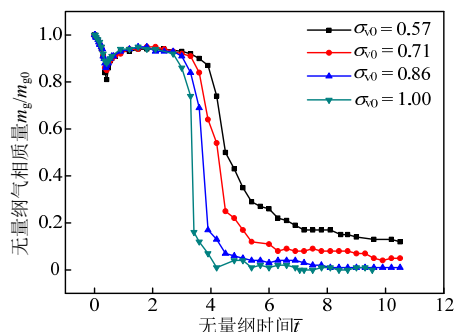


图6 空泡内无量纲气相质量随无量纲时间变化曲线

Fig.6 The dimensionless mass of gas phase in cavity versus dimensionless time

图7为出筒空泡闭合时  $\beta$  随无量纲时间变化关系曲线, 从图7可以看出4种工况下  $\beta$  均呈现波动变化, 并且在空泡尾部发生闭合时,  $\beta$  值均因低于空泡稳定需要的  $\beta \geq 0.378$  而失稳, 空泡内的气体大面积的脱落; 弹射自然空化数  $\sigma_{v0}$  越大,  $\beta$  降低至  $\beta < 0.378$  的所需时间越短, 工况1与工况2的  $\beta$  值甚至降低到远小于0, 这与理论分析结果是一致的。

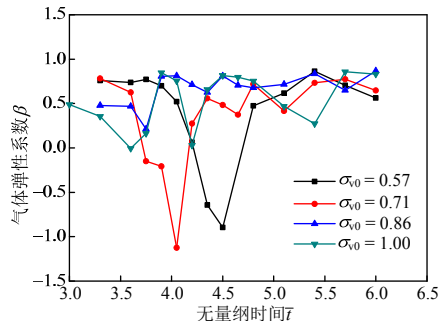
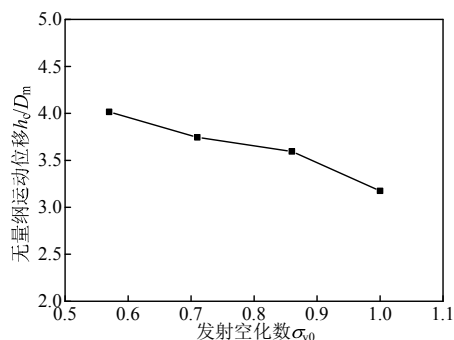


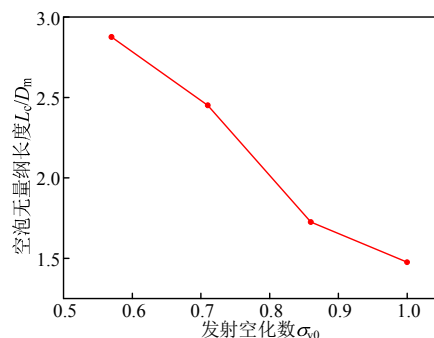
图7  $\beta$  随无量纲时间变化曲线

Fig.7  $\beta$  versus dimensionless time

图8为空泡尾部闭合时, 弹头离开筒口无量纲距离及空泡长度随空化数  $\sigma_{v0}$  变化曲线, 图8(a)可以看出发射空化数越大, 空泡尾部闭合所需运动距



(a) 航行体运动位移随  $\sigma_{v0}$  变化曲线



(b) 出筒空泡长度随  $\sigma_{v0}$  变化曲线

图8 空泡尾部闭合时, 弹头运动位移及空泡长度随发射空化数  $\sigma_{v0}$  变化曲线

Fig.8 At cavity tail close point, the displacement of projectile and cavity length versus ejection cavitation number  $\sigma_{v0}$

离越短, 空泡内气体脱落至空泡尾部闭合的时间点的越早, 弹体肩部均压气体量就越少, 因而形成的通气空泡的长度也就相对越短(如图8(b)所示)。

### 3 结论

针对水下航行体带均压气体出筒的特点, 对发射模型进行简化, 采用数值方法对水下航行体带均压气体出筒过程进行数值模拟。通过对典型弹体模型从不同深度发射出筒过程进行数值研究, 得到了出筒过程空泡形态特征和内部结构, 对比分析不同发射深度出筒空泡尾部闭合时气体弹性系数的变化规律, 并与文献中理论分析结果进行了对比验证。研究结果表明:

(1) 发射筒内均压气体将跟随航行体运动在弹体表面形成通气空泡, 通气空泡的体积与发射空化数有关, 发射空化数越大, 空泡体积越小;

(2) 发射出筒过程, 空泡体积呈波动变化, 自然空化的产生将衰减空泡体积的波动;

发射出筒过程空泡内的气体含量、脱落速度与及空泡尾部闭合位置与空泡内的气体弹性系数有关; 当  $\beta < 0.378$  时, 空泡将失稳, 内部气体而大量脱落至空泡尾部闭合; 随着发射空化数的增大, 空泡尾部闭合时刻提前, 闭合时空泡的长度减短。

### 参考文献:

- [1] 黄寿康. 流体动力·弹道·载荷·环境[M]. 北京: 宇航出版社, 1991: 41—42.  
Huang Shoukang. Hydrokinetics·Ballistic trajectory·Load·Environment [M]. Beijing: Space Navigation Publishing Company, 1991: 41—42. (in Chinese)
- [2] 颜开, 王宝寿. 出水空泡流动的一些研究进展[C]// 第21届全国水动力学研讨会暨第8届全国水动力学学术

- 会议赞两岸船舶与海洋工程水动力学研讨会文集, 青岛, 2008: 9—16.
- Yan Kai, Wang Baoshou. Some research porgerss of water-exit cavity [C]// Proceedings of the 21st National Conference on Hydrodynamics and the 8th National Congress on Hydrodynamics, Qingdao, 2008: 9—16. (in Chinese)
- [3] 罗金玲, 何海波. 潜射导弹的空化特性研究[J]. 战术导弹技术, 2004, 5(3): 14—17.
- Luo Jinling, He Haibo. Research on cavitation for under-water launching missile [J]. Tactical Missile Technology, 2004, 5(3): 14—17. (in Chinese)
- [4] 王汉平, 余文辉, 魏建峰. 潜射模拟弹筒口压力场仿真[J]. 兵工学报, 2009, 8(30): 1009—1013.
- Wang Hanping, Yu Wenhui, Wei Jianfeng. Simulation of pressure field near canister outlet for underwater launched emulated missile [J]. Acta Armamen Tarii, 2009, 8(30): 1009—1013. (in Chinese)
- [5] 吴菊华. 潜射导弹筒口压力场研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2006.
- Wu Juhua. Pressure forecasting of submarine-borne missile canister outlet [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [6] 刘筠乔, 鲁传敬, 李杰, 等. 导弹垂直发射出筒过程中通气空泡流研究[J]. 水动力学研究与进展, 2007, 22(5): 549—554.
- Liu Yunqiao, Lu Chuanjing, Li Jie, et al. An investigation of ventilated cavitating flow in vertical launching of a missile [J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 22(5): 549—554. (in Chinese)
- [7] 程载斌, 刘玉标, 刘兆. 导弹水下潜射过程的流体-固体耦合仿真[J]. 兵工学报, 2008, 29(2): 178—183.
- Cheng Zaibin, Liu Yubiao, Liu Zhao. Fsi simulation on the vertical launching process of underwater missile [J]. Acta Armament Aarii, 2008, 29(2): 178—183. (in Chinese)
- [8] Zhou Lingjiu, Wang Zhengwei. Numerical simulation of cavitation around a hydrofoil and evaluation of a RNG  $k-\varepsilon$  model [J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(1): 0113021—0113027.
- [9] Yakhot V, Orszag S A, Thangham S. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique [J]. Physics of Fluids, 1992, 47: 1510—1520.
- [10] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 78—92.
- Han Zhanzhong, Wang Jing, Lan Xiaoping. Computation examples and application of engineering simulation of Fluent fluid [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004: 78—92. (in Chinese)
- [11] 郝继光, 姜毅, 韩书永, 等. 一种新的动网格更新技术及其应用[J]. 弹道学报, 2007, 19(2): 88—92.
- Hao Jiguang, Jiang Yi, Han Shuyong, et al. A new dynamic mesh update method and its appllications [J]. Journal of Ballistics, 2007, 19(2): 89—92. (in Chinese)
- [12] Abelson H I. Pressure measurements in water-entry cavity [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1970, 44(5): 129—144.
- [13] Shi H H, Motoyuki I, Takuya T. Optical observation of the supercavitation induced by high-speed water entry [C]// Transactions of the ASME, 2000, 122: 806—810.
- [14] Paryshev E V. Theoretical investigation of stability and pulsations of axially symmetric cavities [J]. Trudy TsAGI, 1907: 17—40.
- [15] Paryshev E V. Numerical modeling of ventilated cavity pulsations [J]. Trudy TsAGI, 1985, 2272: 19—28.