

# 空化对飞行器垂向入水特性影响机理研究

李莎靓<sup>1,2</sup>, 刘冰<sup>1</sup>, 田逾<sup>2</sup>, 李世斌<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学空天科学学院, 长沙 410073;

2. 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 飞行器以一定速度入水过程中将发生空化现象, 这对其受力特性及运动轨迹都有重要影响, 是跨介质飞行器的关键问题。针对飞行器不同速度垂向入水中的空化现象开展了数值模拟研究, 采用整体运动网格方法, 分析了飞行器垂向入水过程中, 空化和入水速度对运动特性及流场演化的影响。研究结果表明, 超空泡主要从飞行器外形斜率改变处开始生成, 空泡的闭合与溃灭都会造成受力曲线的较大波动。超空泡的减阻效果主要在飞行器完全进入水面后体现, 且飞行器垂向入水速度越大, 阻力系数越小。

**关键词:** 跨介质飞行器; 入水冲击; 空化; 超空泡; 数值模拟

中图分类号: V211

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2024) 02-0015-09

## Research on Cavitation Influence of Vehicles' Vertical Water Entry Characteristic

LI Shaliang<sup>1,2</sup>, LIU Bing<sup>1</sup>, TIAN Yu<sup>2</sup>, LI Shibin<sup>1</sup>

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. School of Aerospace Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Cavitation phenomenon occurs during the certain-speed entry of the vehicle into the water, which has an important impact on the force and trajectory characteristics, and it is the critical problem of trans-medium vehicles. Numerical simulation is conducted on the cavitation phenomenon of vehicles entering water vertically at different speed. The impact of cavitation and water entry speed on the motion characteristics and fluid field evolution of the vehicle during its vertical entry into water is analyzed. The research results show supercavitation occurs mainly when the slope of the vehicle shape changes. The closure and collapse of cavities will cause the force curve to be larger fluctuations. The drag reduction effect of supercavitation is mainly reflected after the vehicle completely enters the water surface, and the greater the vertical speed of the vehicle entering the water, the smaller the resistance coefficient.

**Key words:** Trans-medium vehicle; Water-entry impact; Cavitation; Supercavitation; Numerical simulation

### 0 引言

随着科学技术的发展, 跨介质飞行器的研发

受到各国极高程度的重视, 成为水动力学研究领域的核心问题<sup>[1-2]</sup>。在出/入水过程中, 跨介质飞行器的冲击问题是一个牵涉固、液、气三者的复杂

收稿日期: 2023-09-24; 修订日期: 2024-03-11

基金项目: 国家自然科学基金 (12372272)

作者简介: 李莎靓 (2001—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为飞行器流-热-固耦合。

通信作者简介: 李世斌 (1987—), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为飞行器轻量化结构设计。

物理过程,包括多相流场与结构响应的相互作用,可被进一步概括为“固液抨击作用”<sup>[3-4]</sup>,具有高耦合、强非线性的特点。

当水中某处的局部压力低于该处温度所对应的饱和蒸气压时发生的局部汽化现象可称为空化<sup>[5]</sup>。大部分时候,空化现象有害但又难以避免,而超空泡技术的产生打破了这一困境。该技术充分利用空化现象,在空化现象的极限状态——超空化状态下,空泡尺寸增大到足以包裹整个水下航行体,并在周围水流与空泡之间形成了明显的气液两相界面,使得水下航行体的航行阻力急剧减小<sup>[6-7]</sup>。

国内外研究学者对入水冲击现象与空泡演化的研究已经有很长的历史渊源。早在1900年,Worthington等<sup>[8]</sup>使用摄影技术,对小球入水进行了实验研究,对球体表面进行打湿处理后,小球入水时水面的溅射状态对其有较大影响。1932年,Wagner<sup>[9]</sup>分析了小倾斜升角模型的入水冲击过程,总结出近似平板理论,为现代入水理论研究奠定了基础。20世纪中叶,May<sup>[10-11]</sup>分别对不同清洁度表面的小球和涂有不同黏性物质的小球进行了入水冲击实验,基于大量实验数据,提出了理想空泡模型,并认为航行体头部直径、阻力系数等会影响到空泡的截面半径。到1995年,Lee<sup>[12]</sup>总结了高速入水过程中的空泡动力学模型,提出了空泡深闭合与表面闭合的概念。Lee等<sup>[13]</sup>根据能量守恒定理建立了航行体入水时的空泡动力学方程,并推导出了描述空泡直径随入水过程变化的公式。赵志敏等<sup>[14]</sup>通过试验提出了一种基于压力时间-空间云图的识别方法,研究潜航体表面空泡发展特性。Sui等<sup>[15]</sup>对40种不同头部形状航行器的斜向入水进行了实验,以此研究航行器入水过程中空泡的演变和冲击载荷的作用。

继理论与实验研究之后,数值模拟成为被广泛使用的重要研究方法。刘华坪等<sup>[16]</sup>通过改变不同椭球头型航行器的长短轴比及入水速度,分析头型对入水及水下航行过程中航行器受到的冲击力变化的影响。杨志宏等<sup>[17]</sup>研究了不同开盖角度、海水温度、发射水深、发射平台速度下航行器运动参数和发射装置流场载荷的变化规律。Jiang等<sup>[18]</sup>对不同头部形状、入水速度、间隔时间和间隔距离的超声速航行器的串联与并联入水进行了数值模拟,详细分析了其受力及运动特性。魏海

鹏等<sup>[19]</sup>模拟了多种不同头部喷气结构的航行体入水过程,分析其降载作用与流场的变化,并捕捉了流动形成、空泡敞开、空泡闭合、空泡溃灭的演化过程。袁绪龙等<sup>[20]</sup>数值模拟了一种采用特定的超空泡外形的跨介质航行器的高速入水过程,结合空泡形态演化分析了航行器所受的冲击载荷特性,并着重分析其尾拍振荡现象与超空泡减阻效果。

采用数值仿真方法对固定外形航行器垂向入水过程进行模拟,并围绕空化对其受力及运动特性的影响规律展开深入研究,着重分析了不同速度下的流场演化过程,为航行器入水的水动力载荷预测和外形设计提供重要的参考。

## 1 物理模型及数值方法

### 1.1 物理模型

采用的计算模型如图1所示。模型为轴对称结构中的一半(底部边界为对称轴),取航行器轴向为重力作用方向。计算域整体大小为 $23L_1 \times 2.1L_1$ 。取头部圆弧段终点为 $a$ 点,外形斜率改变处为 $b$ 点。

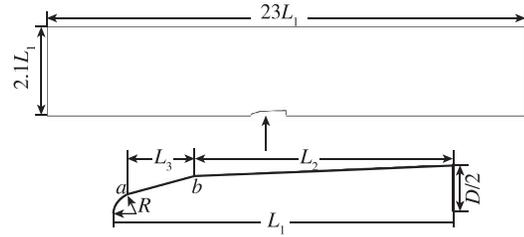


图1 航行器垂向入水模型

Fig.1 Vertical entry model

### 1.2 数值方法

简化航行器入水模型为二维轴对称标准模型,控制方程采用非定常可压缩的雷诺平均 Navier-Stokes 方程。划分的结构网格数量为20万,图2展示了航行器附近的网格划分。边界条件中,底部设置为对称边界条件,左边界、右边界、上边界均设置为压力入口边界条件,航行器边界设置为壁面。

采用包括水、空气、水蒸气在内的三相 VOF (Volume Fraction Model) 模型。VOF 模型指两种或两种以上不相互混合的流体或流体组分共用一套控制方程,通过引入相体积分数实现计算域内相间界面的捕捉。

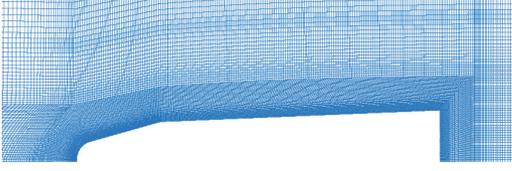


图 2 网格示意图  
Fig. 2 Grids schematic

如果用  $\alpha_q$  表示  $q$  相体积占所在网格所有相总体积的比值, 那么每一个网格中所有相体积分数之和都为 1。当  $\alpha_q$  等于 0 时, 表示单元网格中没有  $q$  相; 当  $\alpha_q$  介于 0 与 1 之间时, 表示单元网格包含  $q$  与其他相; 当  $\alpha_q$  等于 1 时, 表示单元网格中全为  $q$  相。  $q$  相体积分数的连续性方程为

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) \right] = \sum_{p=1}^3 (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (1)$$

其中,  $\dot{m}_{pq}$  是  $p$  相流体到  $q$  相流体的质量传递,  $\dot{m}_{qp}$  是  $q$  相流体到  $p$  相流体的质量传递。

采用基于 Rayleigh-Plesset 气泡动力学方程推导出的 Schnerr-Sauer 空化模型<sup>[21]</sup>, 达到模拟水和水蒸气之间质量传递关系的目的。Schnerr-Sauer 模型是一种比较理想的空化模型, 更好地符合空化现象里空泡的非定常特性。其蒸发率与凝结率是利用质量源项来表示的, 具体形式如下所示

$$\begin{cases} \dot{m}^+ = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R} \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{(p_v - p)}{\rho_l}}, & p \leq p_v \\ \dot{m}^- = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R} \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{(p - p_v)}{\rho_l}}, & p > p_v \end{cases} \quad (2)$$

$$R = \left( \frac{\alpha_v}{1 - \alpha_v} \frac{3}{4\pi n_v} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

其中,  $p_v$  为饱和蒸汽压,  $R$  为空泡半径,  $n_v$  为单位体积空泡数。

采用 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型<sup>[22]</sup>, 具有鲁棒性较好、计算量不大的优点。采用六自由度刚体运动模型, 通过耦合刚体所受的附近流体的力, 从而求解其平动方程、转动方程, 达到获得物体的平移速度、转动速度的目的, 并利用用户自定义函数约束航行器的运动, 使其垂向入水。模拟时先使航行器从离水面 0.01 m 处以一定速度强迫运动至水面, 再使其自由运动, 并考虑重力的影响。

最后采用整体运动网格方法<sup>[23-25]</sup>, 将仿真模型中的所有网格和物体看作一个整体, 一起做刚体运动。即物体运动时, 所有网格的坐标也在发

生相同的改变。此方法避免了网格变形与重构导致的质量降低, 提高了模拟仿真计算的准确性和便捷性。水面高度保持不变通过控制边界处体积分数实现: 当水的体积分数等于 0 时, 表示网格位于水面以上; 当水的体积分数等于 0.5 时, 表示网格高度与水面高度相同 (位于水气交界面); 当水的体积分数小于 1 时, 表示网格位于水面以下。

## 2 数值验证

### 2.1 空化模型验证

基于 Rouse 和 McNown 在水洞中的半球柱空化实验<sup>[26]</sup>, 验证仿真过程中 Schnerr-Sauer 空化模型的可靠性。水流从左侧喷口流出冲击右侧被固定的半球柱, 并利用半球柱上分布的多个压力计测量表面压力。通过改变水流速度, 对比不同空化数下的半球柱表面的压力系数。

压力系数与空化数分别为

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho_w V_0^2} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2} \rho_w V_0^2} \quad (5)$$

其中,  $p_0$  为来流无穷远处压强,  $\rho_w$  为水的密度,  $p_v$  为空泡内压强,  $V_0$  为来流速度。

图 3 给出了不同空化数下半球柱表面压力系数的变化曲线, 其中横坐标 ( $s/d$ ) 为从半球顶点沿外形的曲线长度与球径的比值。从图中可以看到, 空化数越小, 曲线中的“平底”越长, 即产生的空泡越大。从  $\sigma=0.2$  到  $\sigma=0.5$  的仿真结果都与实验吻合良好, 由此可推断, Schnerr-Sauer 空化模型可以准确模拟空化现象。

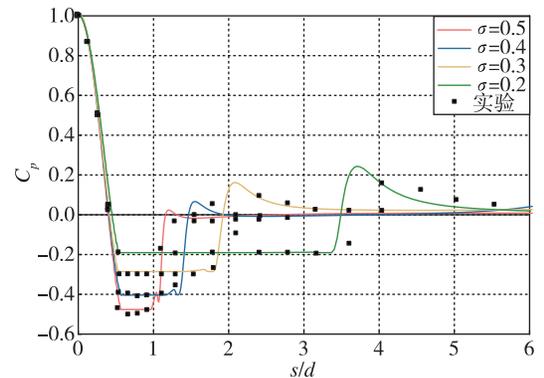


图 3 半球柱表面压力系数

Fig. 3 Hemispherical column surface pressure coefficients

图4展示了空化数为0.2时,半球柱头部区域的压力系数分布云图与水的体积分数分布云图。压力系数分布云图可以看出,压力峰值出现在航行器头部位置,从半球柱头部驻点到空泡所在位置持续下降,经过空泡区后又迅速回升。空泡内主要由低压的水蒸气相构成,在水体的挤压作用下,闭合点附近出现局部高压区。从水的体积分数分布云图可以看到,脱体点空泡壁面与半球柱的球面斜率及曲率相同。空泡尾部的流动十分复杂,出于网格数量不足的原因,未能准确模拟空泡尾部水与水蒸气的相界面,但考虑到仿真数据与实验数据在空泡尾部吻合良好,故可以推断空泡尾部并未对压强相关计算造成太大影响。



(a) 压力系数分布



(b) 水的体积分数分布

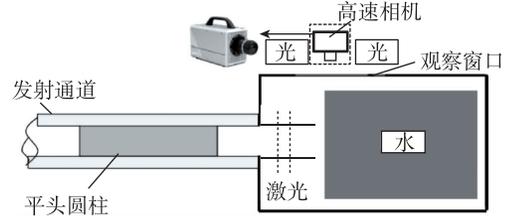
图4  $\sigma=0.2$ 时压力系数分布和水的体积分数分布云图Fig. 4 Clouds of hydrostatic pressure distribution and water volume fraction distribution at  $\sigma=0.2$ 

## 2.2 整体运动网格方法验证

基于张伟等<sup>[27]</sup>的高速入水特性实验,验证整体运动网格方法的正确性,实验设置如图5所示。水容器左侧由一层塑料薄膜密封入口,减小进入水容器时空气对空化作用的影响,利用高速摄像机观察水中轨迹。仿真时使整个计算域充满水,完全排除了空气的干扰,使模拟过程更加真实。

速度与位移随时间变化的理论计算公式如下<sup>[27]</sup>

$$v_p = \sqrt{\sigma_0} v_0 \tan \left( \arctan \frac{1}{\sqrt{\sigma_0}} - k \sqrt{\sigma_0} v_0 t \right) \quad (6)$$

图5 平头圆柱空化实验模型<sup>[26]</sup>Fig. 5 Flat-head cylindrical cavitation experimental model<sup>[26]</sup>

$$s_p = \frac{1}{k} \ln \left[ \frac{\sqrt{1+\sigma_0}}{\sqrt{\sigma_0}} \cos \left( \arctan \frac{1}{\sqrt{\sigma_0}} - k \sqrt{\sigma_0} v_0 t \right) \right] \quad (7)$$

式中, $\sigma_0$ 为初始空化数, $v_0$ 为入水初速度, $k = \rho_w A_0 C_0 / 2m_p$ , $A_0 = \pi(d/2)^2$ , $C_0$ 是来流压力为饱和蒸气压时平头圆柱的阻力系数。

由能量守恒原理推导出的空泡半径随侵彻距离变化的理论关系式<sup>[13]</sup>为

$$R(x) = \sqrt{R_0^2 + 2R_0 \sqrt{\frac{C_0}{2N}} x - \frac{\sigma}{2N} x^2} \quad (8)$$

其中, $N$ 为经验系数, $R_0$ 为平头圆柱半径。

图6和图7对比了实验、理论、仿真中位移与速度随时间的变化规律。图8给出了空化数 $\sigma=0.015$ 时,平头圆柱入水形成空泡尺寸的对比如。

从位移、速度图像和空泡尺寸对比图可以看出,仿真结果与实验及理论计算都吻合良好,且对于空泡尺寸的模拟更贴近实验数据。由此可推断出,在Schnerr-Sauer空化模型下采用整体运动网格技术,具有较高的可行性。

## 3 结果及分析

数值模拟了的航行器垂向入水情况,对航行器

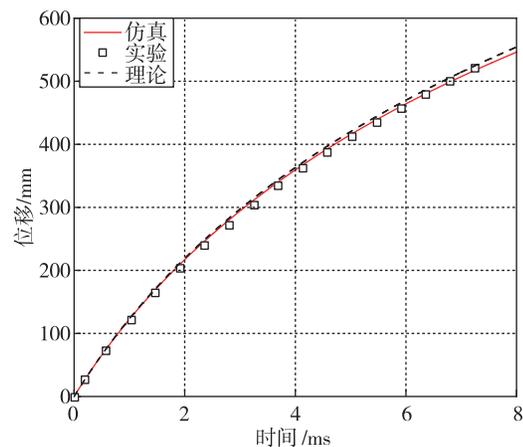


图6 平头圆柱的位移

Fig. 6 Displacements of flat-headed cylinder

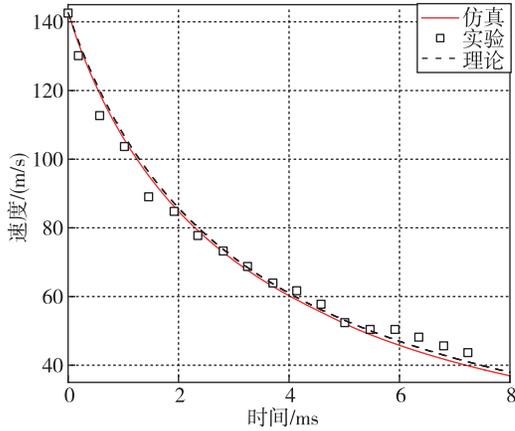


图 7 平头圆柱的速度

Fig. 7 Speed of flat-headed cylinder

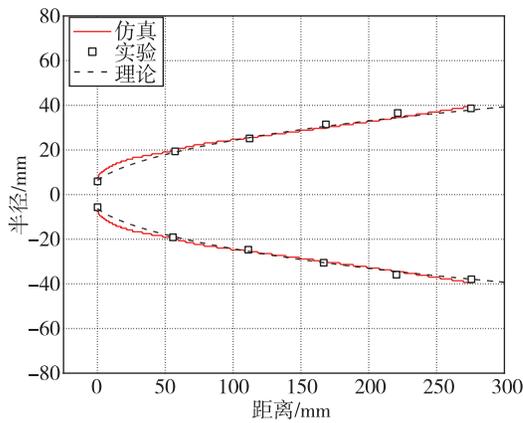


图 8  $\sigma=0.015$  时空泡尺寸对比

Fig. 8 Comparison of cavity size at  $\sigma=0.015$

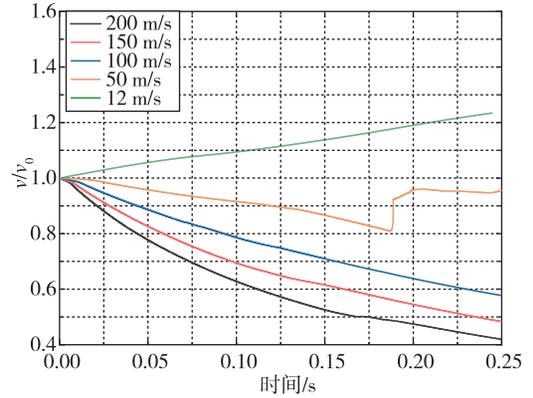
高速入水运动特性展开研究，并分析了不同速度下，空泡生成、闭合、溃灭的演化过程及其影响规律。

### 3.1 入水速度对运动特性的影响

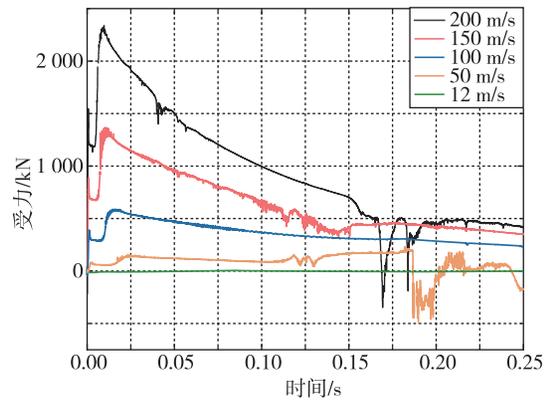
图 9 给出了 0~0.25 s 入水初期不同速度下飞行器入水特性对比。速度图像纵坐标采用飞行器速度  $v$  与其对应初速度  $v_0$  的比值。入水速度越大，飞行器受阻力越大，速度衰减越快。

结合图 10 可看出，入水速度为 12 m/s 时，飞行器未被空气或水蒸气包裹，未发生空化，飞行器受阻力较小且受重力影响较大，所以速度随时间增加而增大。

飞行器以 100 m/s 及以上速度垂向入水时，其运动特性变化规律较为相似。经过入水初期，由于飞行器发生空化现象，其体部和尾部被空泡



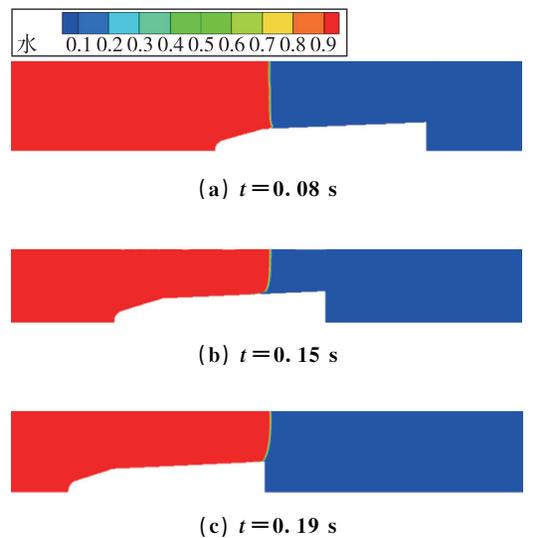
(a) 速度特性



(b) 受力特性

图 9 0~0.25 s 时飞行器入水特性

Fig. 9 Vehicles' water entry characteristics at 0~0.25 s



(c)  $t=0.19$  s

图 10 12 m/s 速度入水时水的体积分分布云图

Fig. 10 Clouds of water volume fraction distribution at water-entry speed 12 m/s

包裹,在一定时间内不被沾湿,航行器基本达到了最大的沾湿面积,如图11所示,受力曲线出现峰值。随后由于航行器速度减小,阻力也逐渐减小,且空泡的生成使减阻作用逐渐体现。波谷的出现,一是因为空泡进入了闭合阶段,如图11的变化过程,表面闭合引起了流场较大的扰动,二是由于采用显示VOF方法捕捉自由液面,该格式也易造成流场脉动。而100 m/s中空泡尚未进入闭合阶段,故其受力曲线较为稳定。

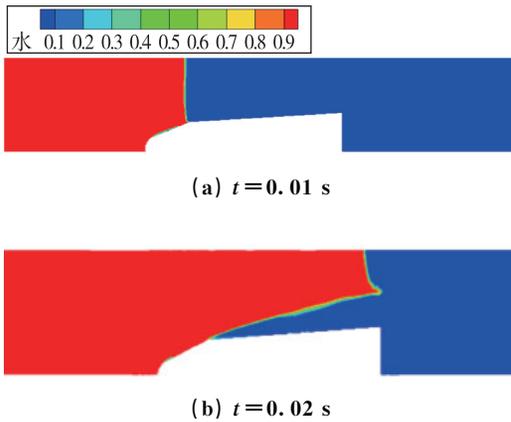


图11 100 m/s速度入水时水的体积分数分布云图  
Fig. 11 Clouds of water volume fraction distribution at water-entry speed 100 m/s

入水速度为50 m/s时,空化现象干扰航行器的运动,速度与受力表现为不同阶段的骤变。图12给出了0~0.55 s航行器速度与受力特性变化。0.1~0.3 s曲线变化较为紊乱,这是因为出现了空泡的闭合与溃灭。

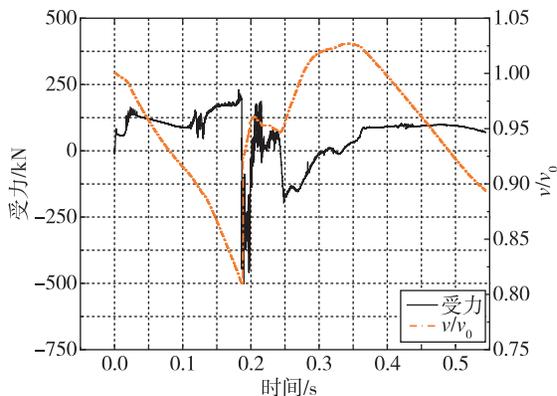


图12 50 m/s时航行器入水特性  
Fig. 12 Vehicles' water entry characteristics at 50 m/s

为进一步研究空泡的减阻效果,引入阻力系数公式如下

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho v^2 S} \quad (9)$$

其中, $F_x$ 表示航行器所受阻力, $v$ 为航行器的时变速度, $S$ 为航行器的投影面积,取 $2.49 \text{ m}^2$ 。

针对100 m/s及以上的入水速度,进一步模拟了其空泡从生成到闭合的过程。表1给出了各速度下的阻力系数最大值 $C_{x\max}$ 。可以看出,随着入水速度的增大,阻力系数峰值逐渐减小,且阻力系数减小的趋势也逐渐放缓,尤其是在产生稳定空泡后(100 m/s及以上)。

表1 最大阻力系数

| 速度/(m/s)    | 12      | 50      | 100     | 150     | 200     |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $C_{x\max}$ | 0.139 7 | 0.080 4 | 0.050 9 | 0.049 6 | 0.048 5 |

图13为航行器入水阻力系数( $C_x$ )对比图。在航行器头部撞击水面时,阻力系数与头部压强出现最大值。随后航行器进入水中,空泡的减阻效果开始体现,航行器的阻力系数逐渐降低。空泡的闭合与溃灭都会造成阻力系数曲线的较大波动。产生稳定超空泡时,航行器阻力系数总体偏低,且垂向入水速度越大,阻力系数越小。

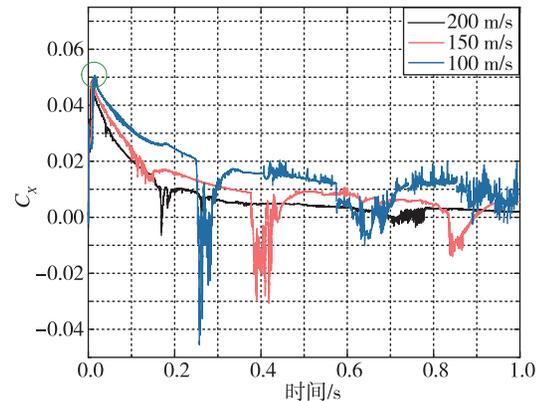


图13 不同入水速度下航行器 $C_x$ 对比  
Fig. 13 Comparison of vehicle  $C_x$  at different water entry speeds

### 3.2 入水速度对流场演化的影响

图14展示了不同速度下水的体积分数和静压云图随着时间的变化,结合航行器受力图像,对不同速度下的流场演化展开分析。航行器以12 m/s垂向入水时,从水相云图可以看出未发生空化现象。

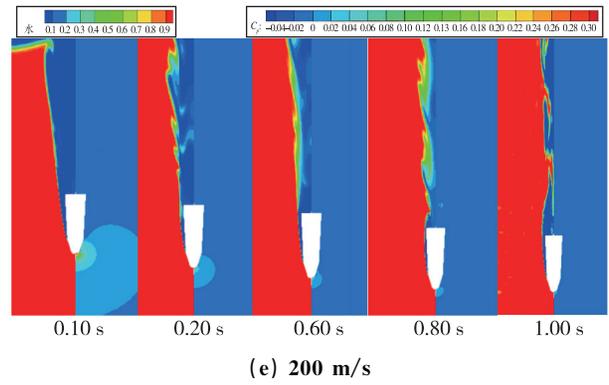
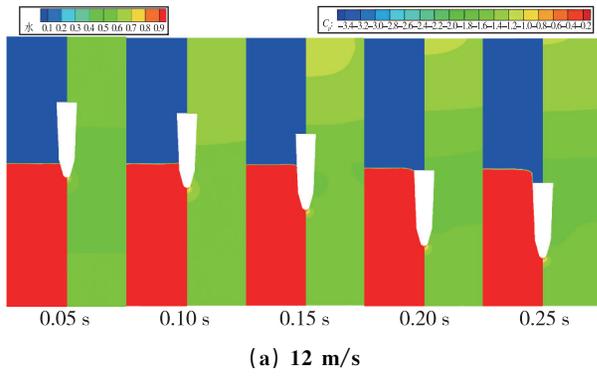
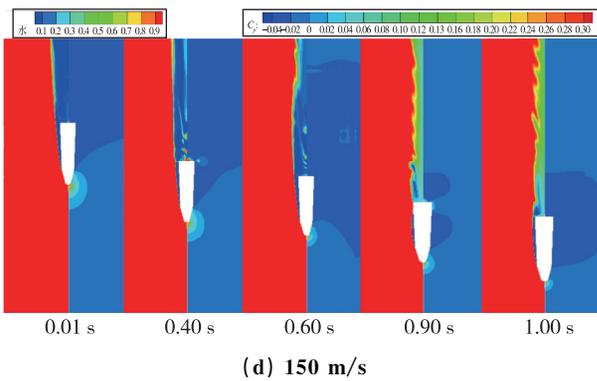
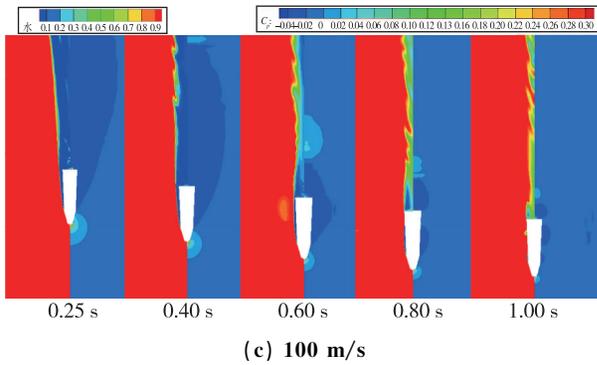
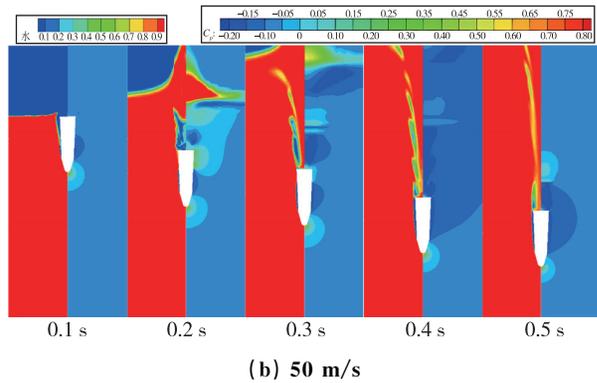


图 14 水的体积分数和静压云图随着时间的变化

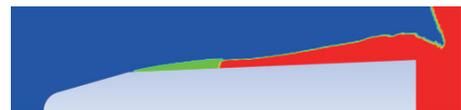
Fig. 14 Water volume fraction and hydrostatic pressure clouds



以 50 m/s 的速度垂向入水时, 0.1 s 时飞行器的中后部出现了明显的水气交界面见图 15。入水过程中未能产生完整的空泡包裹飞行器, 而是在飞行器的前部和尾部分别形成空泡。前部空泡主要由空化凝结水蒸气组成, 尾部空泡主要由闭合的空气组成。可以看出, 自 0.1 s 起, 既是前部空泡的发展过程, 也是尾部空泡的从闭合到溃灭过程, 所以飞行器受到的扰动较大。随后, 尾部空泡由闭合到溃灭, 过程中主要受重力与剪切力作用, 强剪切力导致空泡形态拉长夹断, 同时伴随着气流回击现象, 造成了 0.2 s 附近的受力波动。在尾部空泡收缩时, 水相接触到飞行器体部, 与空泡内部混合介质相作用, 并在前部空泡闭合点与尾部空泡分离点间产生局部高压区, 直至空泡完全溃灭。0.365 s 后, 尾部空泡完全脱离飞行器, 前部空泡闭合, 如图 15 (d) 所示, 水蒸气包裹整个侧面, 还有部分在飞行器后方凝结。



(a)  $t=0.1$  s



(b)  $t=0.19$  s

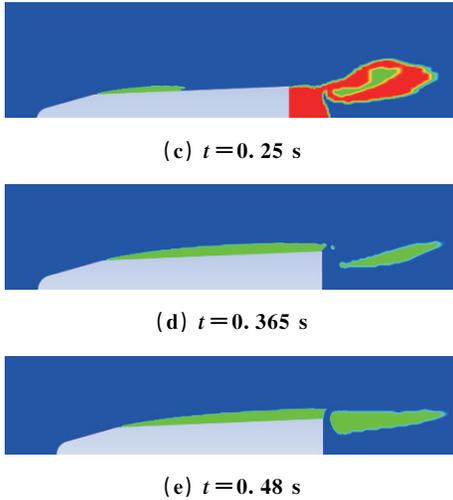


图 15 50 m/s 速度入水时混合相云图

Fig. 15 Clouds of mixture phase at water-entry speed 50 m/s

图 16 给出了航行器以 100 m/s 的速度垂向入水仿真的空泡形态图。从压力系数分布图中可以看出,在航行器头部存在高压区,且头部驻点处压强最大,从头部高压区顺着航行器外形压强持续下降到饱和蒸汽压,经过与  $a$  点(见图 1)后压力迅速回升。超空泡主要从  $b$  点(见图 1)开始生成,而在  $a$  点也会发生空化,出现少量水蒸气凝结现象。 $a$  点空泡脱体点为光滑脱体点,满足光滑分离的 Brilouin-Villat 条件<sup>[28]</sup>,即脱体点处空泡壁面与半球柱的球面曲率相同。 $b$  点空泡脱体点为固定脱体点,发生在物面曲率不连续的尖角处。

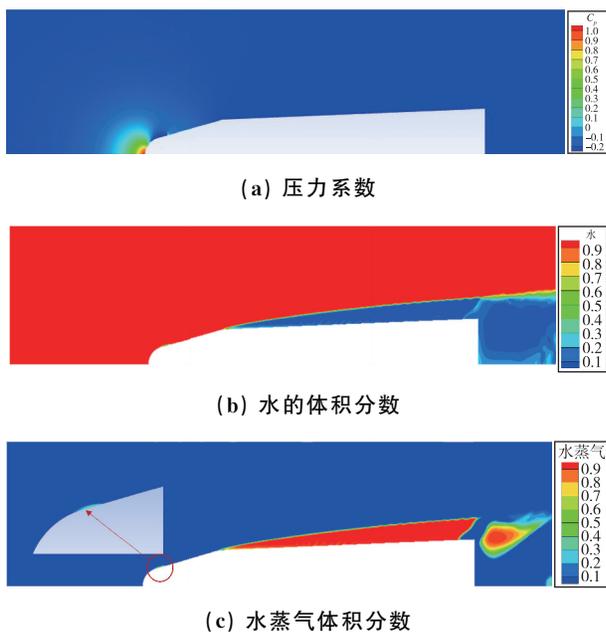


图 16 100 m/s 速度入水时云图

Fig. 16 Clouds at water-entry speed 100 m/s

## 4 结论

以空化现象为重点,对航行器垂向入水过程展开了数值模拟研究,通过对比航行器入水的速度衰减、位移、受力曲线,分析空化对航行器垂向入水中运动特性和入水空泡形态演化过程,得出结论如下。

1) 当航行器垂向入水速度不够大,不足以在入水过程中产生包裹的超空泡时,空化现象会干扰航行器的运动,造成受力波动与速度突变。

2) 稳定空泡的产生有助于减小航行器阻力,减阻效果主要体现在航行器完全进入水面后;航行器垂向入水速度越大,其阻力系数越小;阻力系数峰值出现在垂向入水初期航行器沾湿面积达到最大时。空泡的闭合与溃灭都会造成阻力系数曲线的较大波动。

3) 超空泡主要从航行器外形斜率改变处开始生成,圆弧衔接处也会产生空泡及水蒸气凝结的现象,且空泡起点处的壁面曲率与航行器表面曲率相同。

## 参考文献

- [1] 王聪,许海雨,卢佳兴. 跨介质航行器入水多相流场及运动特性研究现状与展望[J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(1): 38-49.
- [2] 杨卫丽,廖孟豪,方勇. 美俄高超声速导弹发展取得突破性进展[J]. 战术导弹技术, 2019(1): 15-18, 32.
- [3] 秦洪德,赵林岳,申静. 入水冲击问题综述[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(S1): 152-157.
- [4] 王浩宇,李木易,程少华,等. 航行体高速入水问题研究综述[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(3): 65-70.
- [5] Michel J M. Introduction to cavitation and supercavitation[C]// RTO AVT Lecture Series On Supercavitating Flows, Bruxelles, Belgium, 2001.
- [6] 崔乃刚,陈亮,曹伽牧,等. 水下航行体减阻技术综述[J]. 宇航总体技术, 2023, 7(1): 1-13.
- [7] 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.
- [8] Worthington A M, Cole R S. Impact with a liquid surface studied by the aid of instantaneous photography. Paper II[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 1900, 194 (252-261): 175-199.
- [9] Wagner H. Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces[J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics; Zeitschrift fur Angewandte Math-

- ematik und Mechanik, 1932, 12(4): 193-215.
- [10] May A. Effect of surface condition of a sphere on its water-entry cavity[J]. Journal of Applied Physics, 1951, 22(10): 1219-1222.
- [11] May A. The cavity after vertical water entry[R]. Washington, USA: Naval Ordnance Laboratory, 1968.
- [12] Lee M. Generation of shock waves by a body during high-speed water entry[D]. Texas: The University of Texas at Austin, 1995.
- [13] Lee M, Longoria R G, Wilson D E. Cavity dynamics in high-speed water entry[J]. Physics of Fluids, 1997, 9(3): 540-550.
- [14] 赵志敏, 王宝和, 于峰. 基于压力测量数据的空泡推进过程识别方法及比较[J]. 战术导弹技术, 2018(5): 45-48, 56.
- [15] Sui Y T, Zhang A M, Ming F R, et al. Experimental investigation of oblique water entry of high-speed truncated cone projectiles: cavity dynamics and impact load[J]. Journal of Fluids and Structures, 2021, 104: 103305.
- [16] 刘华坪, 余飞鹏, 张岳青, 等. 不同头型鱼雷入水冲击载荷研究[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(6): 527-532.
- [17] 杨志宏, 苗佩云, 展志焕, 等. 水下多弹发射流场仿真分析[J]. 战术导弹技术, 2020(4): 201-207.
- [18] Jiang Y H, Li Y, Guo J, et al. Numerical simulations of series and parallel water entry of supersonic projectiles in compressible flow[J]. Ocean Engineering, 2021, 235: 109155.
- [19] 魏海鹏, 辛万青, 刘华坪, 等. 不同喷气结构对航行体高速入水冲击的影响研究[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(6): 41-46, 53.
- [20] 袁绪龙, 栗敏, 丁旭拓, 等. 跨介质航行器高速入水冲击载荷特性[J]. 兵工学报, 2021, 42(7): 1440-1449.
- [21] Schnerr G H, Sauer J. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics[C]// 4<sup>th</sup> International Conference On Multiphase Flow, New Orleans, USA, 2001.
- [22] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new k- $\epsilon$  eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows[J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [23] 屈秋林, 胡茗轩, 郭昊, 等. 整体运动网格法在飞机水上迫降模拟中的应用[J]. 航空科学技术, 2015, 26(11): 1-9.
- [24] 张旭, 刘沛清, 屈秋林. 大型飞机机身垂直入水冲击特性数值研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2018(2): 25-32.
- [25] 文学良, 丁世力, 刘沛清. 导弹入水空化的数值模拟与理论分析[C]// 全国工业流体力学会议, 北京, 2019.
- [26] McNown J S, Rouse H. Cavitation and pressure distribution: head forms at zero angle of yaw[M]. Iowa City, Iowa, USA: State University of Iowa, 1948.
- [27] 张伟, 郭子涛, 肖新科, 等. 弹体高速入水特性实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(6): 579-584.
- [28] 袁绪龙, 张宇文, 刘乐华. 回转体局部空化流场数值模拟的一种改进算法[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(S4): 345-348.

**引用格式:**李莎靓, 刘冰, 田逾, 等. 空化对航行器垂向入水特性影响机理研究[J]. 宇航总体技术, 2024, 8(2): 15-23.

**Citation:** Li S L, Liu B, Tian Y, et al. Research on cavitation influence of vehicles' vertical water entry characteristic [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2024, 8(2): 15-23.