

超空泡射弹异步并联倾斜入水空泡演化与运动特性分析

高词松¹, 鹿麟¹, 祁晓斌², 闫雪璞¹, 王辰², 胡彦晓¹, 张东晓¹

(1.中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051; 2.西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

摘要:基于 VOF 多相流模型与重叠网格技术建立了超空泡射弹异步并联倾斜入水数值方法,利用单发射弹倾斜入水实验对数值方法的有效性进行了验证,在此基础上,分别对不同初始间距及入水顺序下前后两射弹的空泡演化与运动特性进行了数值模拟与分析。研究表明:对于前发射弹,在初始间距为 0.5 倍弹长时,由于受到后发射弹空泡剧烈挤压,前发射弹无法产生完整空泡包裹弹体,运动受到严重影响并最终失稳;同时,前发射弹自上侧入水与自下侧入水相比,其空泡受到的挤压程度更大,沾湿更早且失稳更快;随着初始间距的增大,前发射弹附近空泡受后发射弹的影响减弱,2 种入水顺序下均运动平稳。对于后发射弹,由于前发射弹空泡的持续作用,其空泡始终不对称,运动稳定性受到影响,在间距为 0.5 倍弹长时向内侧偏转失稳,在间距为 1 倍弹长时运动平稳,间距为 2 倍和 3 倍弹长时向外侧偏转失稳,且 2 种入水顺序下运动规律基本一致。

关键词:超空泡射弹;异步并联入水;倾斜入水;数值模拟;空泡演化;运动特性

中图分类号:TJ012.3

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2024)01-0018-10

超空泡减阻技术可大大降低航行体水下运动所受阻力,提升水下兵器的打击速度和打击距离。在实际作战中,为提高打击目标的有效性,往往需要向水中进行密集射击,而这一过程中就涉及超空泡射弹异步并联倾斜入水问题,异步并联入水的超空泡射弹会相互影响,进而影响射弹运动稳定性,降低射击精度,因此对超空泡射弹异步并联倾斜入水问题开展研究对提升入水武器打击效果具有重要意义。

近年来,众多学者针对倾斜入水问题的研究大多集中在单发射弹入水,其中李佳川等^[1]对弹体模型以不同扰动角速度入水过程进行了弹道仿真;陈晨等^[2]对小型运动体高速倾斜入水过程中流体动力特性、流场结构特性与空泡发展进行了分析;宋武超等^[3]通过数值模拟对不同入水速度和不同入水角度回转体低速倾斜入水过程中的流场特性进行了

分析;路丽睿等^[4]开展了不同头型射弹低速倾斜入水的对比试验,得到了射弹头型对弹道特性的影响规律;秦杨等^[5]通过数值模拟分析了不同入水角下弹体空泡形态发展规律、弹道特性及流体动力特性的变化规律;施瑶等^[6]研究了弹头形状、入水速度和入水角度对射弹入水时流体动力学的影响;高英杰等^[7]对回转体倾斜高速入水的载荷分布、空泡形态、冲击载荷等开展了数值研究;宋志杰等^[8]通过实验和数值方法研究了圆柱形射弹高速倾斜入水下空泡的溃灭及重新产生过程。上述研究针对单发射弹倾斜入水过程中空泡演化、流场特性和弹道特性已进行了较为完善的分析,然而,目前对于射弹并联入水问题的研究仍较少,鹿麟等^[9]对超空泡射弹异步并联垂直入水的空泡演化和运动特性展开了研究;王聪等^[10]对运动体并联入水过程的运动特性进行了研究,并提出运动体相对运动趋势的预测公式;魏英杰等^[11]研究了不同入水速度对圆柱体并联入水运动特性的影响;余德磊等^[12]开展了不同初始参数的回转体高速并联入水模拟计算,得到了不同参数下的流场及运动特征。但以上研究中运动体大多

收稿日期:2023-02-27

基金项目:国家自然科学基金(52201385)与山西省自然科学基金(20210302123023)资助

作者简介:高词松(1999—),硕士研究生

通信作者:鹿麟(1988—),副教授 e-mail: lulin2016@nuc.edu.com

为简单回转体,且均为垂直入水,缺乏对更贴合实际的并联弹丸倾斜入水问题的研究。射弹倾斜入水初期射弹空泡不对称,且倾斜运动过程中所受水动力与垂直入水也有所不同,导致超空泡射弹倾斜并联入水过程与垂直并联入水区别较大。

本文基于 VOF 多相流模型与重叠网格技术建立了超空泡射弹异步并联倾斜入水数值方法,通过开展单发射弹倾斜入水实验,对数值方法的有效性进行了验证,利用此数值方法对超空泡射弹异步并联倾斜入水进行数值模拟,分析研究了前后两射弹横向间距一定时,不同入水顺序及不同前后间距下的射弹入水空泡演化及运动特性。

1 数值计算方法

1.1 控制方程

超空泡射弹倾斜入水过程涉及水、水蒸气和空气三相均质流体,本文采用 VOF 多相流模型对射弹倾斜入水过程进行描述。

混合介质的连续性方程为

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m u_i) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_m u_i u_j) = \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \left[(\mu_m + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ρ_m 为混合密度, $\rho_m = \alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v + \alpha_g \rho_g$, ρ_l, ρ_v 和 ρ_g 分别为水、水蒸气和空气的密度, α_l, α_v 和 α_g 分别为三相的体积分数,三者关系为 $\alpha_l + \alpha_v + \alpha_g = 1$ 。
 x_i, x_j 为笛卡尔坐标下位移分量; u_i, u_j 为速度分量; p 为压力; μ_m 和 μ_t 分别为混合介质的动力黏度和湍流动力黏度。

1.2 湍流模型和空化模型

本文采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型,其对于射流、旋转、边界处有较大压力梯度及分离流的计算更加准确,其表达式为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3) \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \end{aligned}$$

$$\rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中: G_k 为速度梯度引起的湍动能; G_b 为浮力引起的湍动能; Y_M 为脉动扩张在湍流耗散率所占当量; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 为经验系数; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 为 k 和 ε 的普朗特常数; S_k 和 S_ε 为源项。

本文空化模型采用 Schnerr-Sauer 空化模型,水和水蒸气两相间质量传递方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_v u_i) = F_{\text{vap}} \frac{2\alpha_{\text{nuc}}(1 - \alpha_v)}{R_B} \\ \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l}} - F_{\text{cond}} \frac{3\alpha_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l}} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\alpha_{\text{nuc}} = 5 \times 10^{-4}$ 为不可凝结气体体积分量; R_B 为气核半径, $R_B = 1 \times 10^{-6}$ m; p 为远场压力; p_v 为饱和蒸汽压; $F_{\text{vap}} = 50, F_{\text{cond}} = 0.001$ 。

1.3 数值方法验证

通过开展单发射弹倾斜入水实验对本文所用数值方法的准确性和合理性进行验证,实验装置示意图及实验射弹模型如图 1 所示。

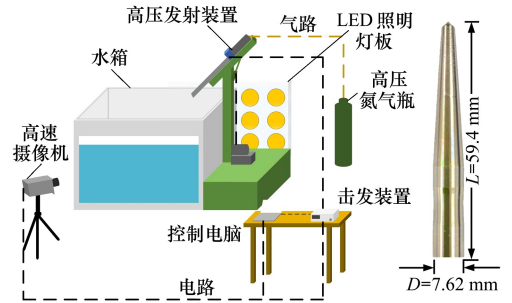


图 1 实验装置及实验射弹示意图

实验装置包括水箱、高压发射装置、LED 照明灯板、高速摄像机、击发装置及控制电脑,实验射弹采用弹头为圆锥空化器的超空泡射弹,射弹直径为 $D = 7.62$ mm,弹长为 $L = 59.4$ mm,空化器锥角为 100° ,材质为钢,质量为 12.6 g。数值计算模型中射弹初始位于空气域,入水初始速度及入水初始角度分别为 200 m/s 和 60° ,与实验射弹初始入水参数相同。图 2 和图 3 分别为射弹入水空泡形态与速度衰减的数值计算和实验结果对比,可看出数值计算结果与实验结果基本吻合,说明本文所选数值方法可有效模拟超空泡射弹倾斜入水。

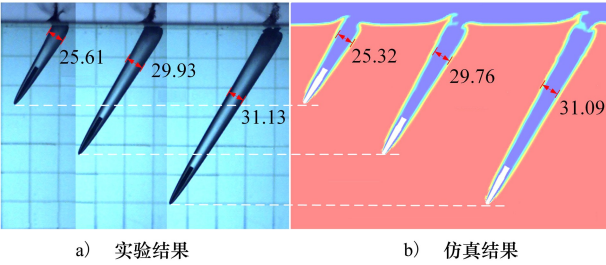


图 2 单发射弹倾斜入水实验与仿真空泡形态对比图(单位:mm)

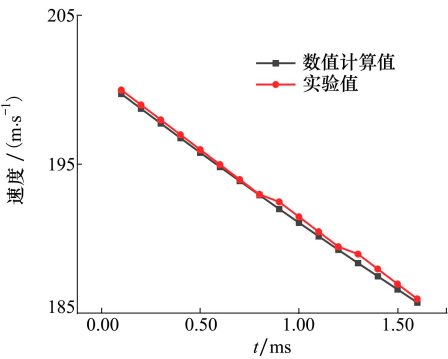


图 3 射弹速度变化曲线

1.4 计算模型设置与网格划分

本文采用射弹模型与前文所述实验射弹完全一致,图 4 为前后两射弹相对位置示意图,两射弹速度方向与自由液面初始夹角 β 为 60° ,两射弹内侧之间距离始终为 D ,前后两弹尖之间距离为 S 。定义位于虚线左侧的区域为上侧,位于虚线右侧的区域为下侧;前发射弹弹尖接触自由液面时 $t_1 = 0$;无量纲量 $\Delta = S/L$;前后两射弹轴向左侧面为背水面,轴向右侧面为迎水面。

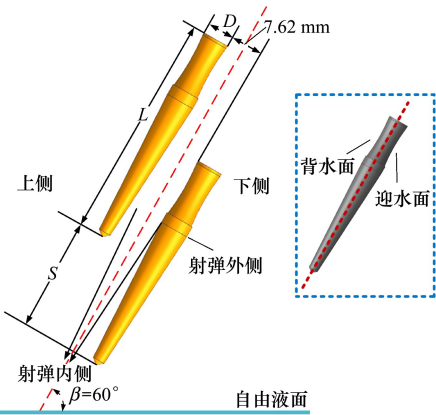


图 4 射弹相对位置示意图

本文所用边界条件及计算域设置如图 5 所示,

本文所采用的超空泡射弹为对称回转体,因此计算域采用 1/2 计算域,在对称面设置对称边界条件,侧面设置固壁边界条件,顶部及底部设置压力出口条件,使用 FLUENT 仿真软件进行数值计算。

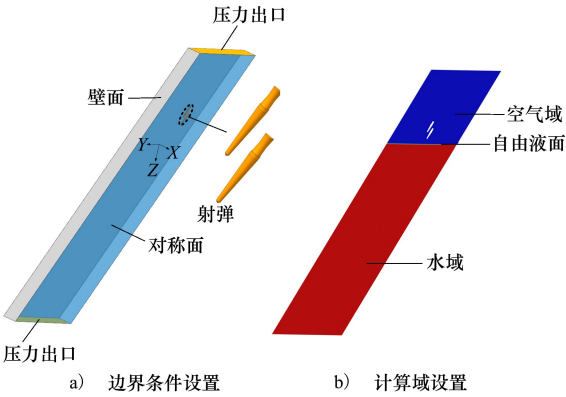


图 5 边界条件及计算域设置示意图

本文采用重叠网格技术,如图 6 所示,整个计算域由背景域和子域构成,在背景域对射弹运动区域和自由液面进行网格加密,对距离射弹较远的外层区域使用较疏的网格,同时在射弹子域的射弹表面添加边界层网格。

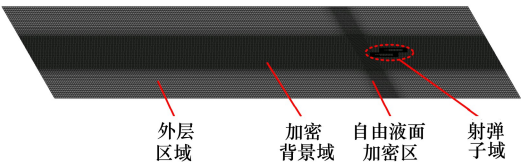


图 6 计算域网格

为保证仿真结果独立性,按照上文网格疏密分布规律,调整网格尺寸,开展网格无关性验证,分别使用网格总数为 95 万,125 万,155 万的 3 套网格对 $\Delta = 3.0$ 、上侧射弹先入水工况进行数值计算,图 7 为不同计算域网格下的前发射弹速度变化曲线。可以

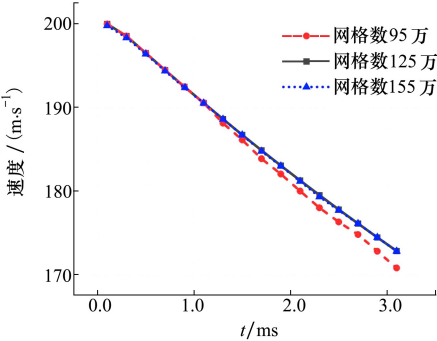


图 7 不同网格数下上侧射弹速度变化曲线

看出,125 万网格和 155 万网格的速度变化规律基本相同,故本文采用 125 万网格的计算域。

2 计算结果及讨论

2.1 异步并联斜入水空泡演化分析

图 8~10 依次为 $\Delta=0.5, 1.0, 3.0$ 时不同入水顺序下的空泡演化规律,不同工况下前后两发射弹的初速均为 200 m/s ,入射角均为 60° 。从图中可以看出,不同前后间距和入水顺序下前后两射弹的空泡演化具有一定差异。对于前发射弹,当 $\Delta=0.5$ 时,如图 8a)~8b) 所示,随着后发射弹的入水,前发射弹附近空泡内侧被挤压收缩,导致空泡无法完全包裹前发射弹,导致射弹发生沾湿。但不同入水顺序下,前发射弹的沾湿情况不同,当上侧射弹先入水时,前发射弹在 0.23 ms 左右内侧尾部即被流体冲击并发生沾湿,且随着入水深度的增加,前发射弹迎水面持续沾湿,射弹最终失稳;而当下侧射弹先入水时,前发射弹在 0.63 ms 左右内侧尾部才与空泡壁接触发生部分沾湿,随后在空泡内发生一次尾拍,在 1.43 ms 左右射弹外侧与空泡壁接触,沾湿面积持续增大,最终失稳并对后发射弹运动造成影响。可以发现 2 种入水顺序下前发射弹运动差异性较大,将在后文重点分析。观察图 9~10 可发现,随着两射弹前后距离的不断增加,前发射弹周围空泡受后发射弹的影响不断减弱,不同入水顺序下前发射弹周围空泡均扩张良好,射弹运动平稳。

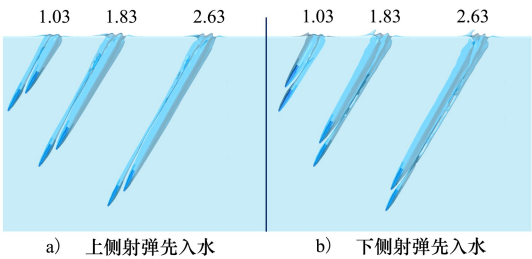


图 9 $\Delta=1.0$ 时空泡演化过程(单位:ms)

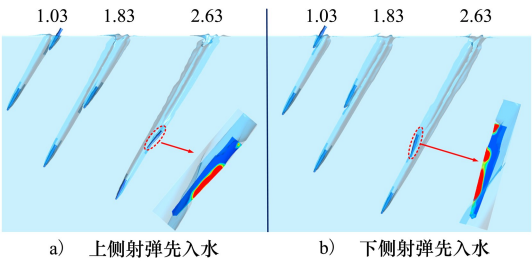


图 10 $\Delta=3.0$ 时空泡演化过程(单位:ms)

而对于后发射弹,由图 8~10 可观察到,不同工况下后发射弹空泡沿射弹轴线两侧始终不对称,自身运动稳定性持续受到影响,在 $\Delta=0.5$ 时向射弹内侧偏转; $\Delta=1.0$ 时偏转幅度很小,射弹运动平稳; $\Delta=3.0$ 时向射弹外侧偏转。

首先对 $\Delta=0.5$ 时前发射弹运动的差异进行分析。图 11 为射弹倾斜入水时空泡壁面附近流体 Y 方向速度矢量图,可以发现当射弹倾斜入水时,空泡壁面上指向 Y 轴正方向的速度矢量箭头数目更多且数值更大。这是因为当射弹倾斜入水时,在 Y 轴正方向上有速度分量 V_y ,导致射弹弹尖与流体接触时,射弹背水面附近的流体会获得更多动能,此时背水面空泡壁面附近流体速度值更大,且速度方向指向 Y 轴正方向,这也导致射弹倾斜入水时形成的空泡口向 Y 轴正方向扩张距离更远,有助于入水前期射弹背水面空气随射弹进入空泡促进背水面空泡扩

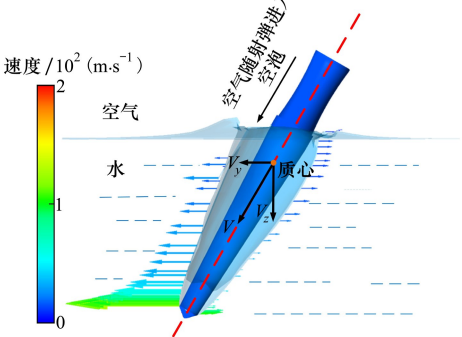


图 11 倾斜入水速度分量示意图

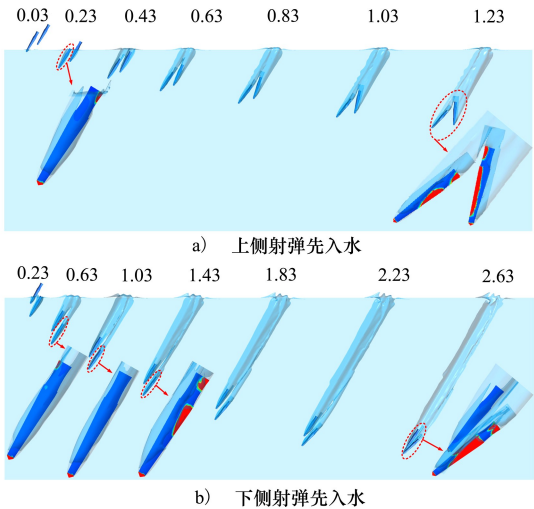


图 8 $\Delta=0.5$ 时空泡演化过程(单位:ms)

张。最终导致倾斜入水射弹的迎水面附近流体动能和空泡直径均较小,而背水面附近流体动能更大,空泡直径也更大。

当上侧射弹先入水时,后发射弹的背水面空泡与前发射弹迎水面空泡相互挤压;而当下侧射弹先入水时,后发射弹的迎水面空泡与前发射弹的背水面空泡相互挤压,由于射弹倾斜入水时迎水面和背水面附近流体动能和空泡直径的差异,当上侧射弹先入水时,后发射弹对前发射弹空泡的挤压更加剧烈。从图 12 也可以观察到,当上侧射弹先入水时,两射弹内侧流体 Y 方向速度矢量均由后发射弹指向 Y 轴正方向,前发射弹内侧空泡被严重挤压,前发射弹内侧尾部此时已发生沾湿;而当下侧射弹先入水时,两射弹内侧流体 Y 方向速度矢量除了有从后发射弹指向 Y 轴负方向的,还有从前发射弹指向 Y 轴正方向的,前发射弹内侧空泡被挤压程度较小,空泡此时仍能包裹射弹。同时发现上侧射弹先入水后 0.23 ms 发生沾湿时,其还未完全入水形成稳定空泡,流体的冲击和射弹沾湿会导致其运动稳定性被严重破坏,无法依靠自身恢复运动,故其内侧持续沾湿快速失稳;结合前文知,当下侧射弹在先入水时,其在水入后 0.63 ms 才发生沾湿,此时其已完全入水生成稳定空泡,自身稳定性较强,所以在沾湿后先发生一次尾拍,之后才持续沾湿并最终失稳。上述两方面原因最终导致了 $\Delta=0.5$ 时 2 种入水顺序下前发射弹的运动差异。

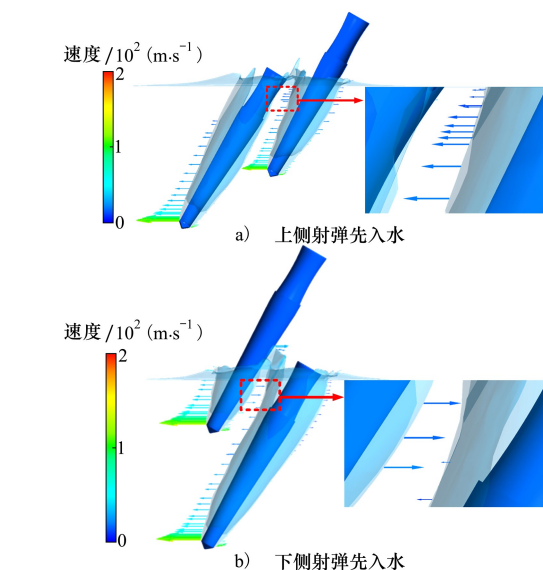
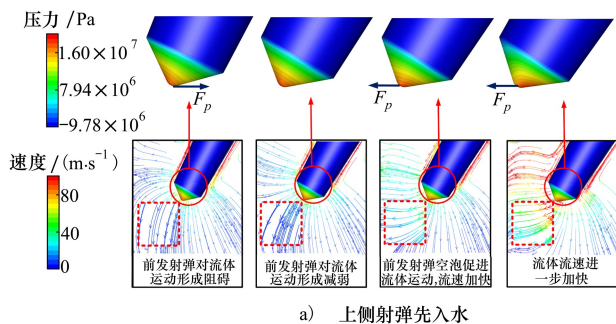


图 12 0.23 ms 时 $\Delta=0.5$ 工况流体 Y 方向速度矢量示意图

结合图 13~15 对上述后发射弹的偏转原因进行分析。图 13a) ~ 13b) 为不同入水顺序下后发射弹弹尖附近流线及压力图,可以发现随着 Δ 的增大,不同入水顺序下后发射弹弹尖附近流线及压力图的变化规律一致,均为弹尖内侧流体由运动受阻变为流速加快,弹尖高压区也由弹尖内侧逐步向弹尖外侧移动,且由前文可知不同入水顺序下后发射弹偏转情况同样一致,故下文仅对上侧射弹先入水时的后发射弹展开分析。

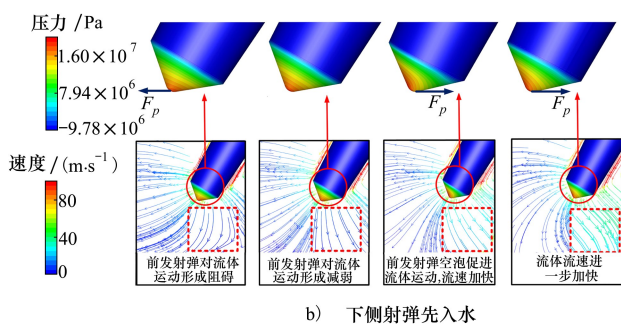


图 13 后发射弹弹尖附近流线及弹尖压力

图 14 为上侧射弹入水运动 4L 时空泡壁不同特征位置 ($\Delta=0.5, 1.0, 2.0, 3.0$) 处截面速度矢量图,其中 $A_{0.5}, A_{1.0}, A_{2.0}, A_{3.0}$ 分别表示上侧射弹先入水 $\Delta=0.5, 1.0, 2.0$ 和 3.0 时的后发射弹。从图 14 可以看出,随着 Δ 增大,前发射弹空泡壁面上的速度值逐渐减小。这是由于射弹入水后会将动能不断地传递

给周围流体并促进空泡扩张,随着入水距离的增加,在内外压差力及流体阻力的作用下,空泡扩张速度不断衰减,同时距离弹头越远的位置空泡扩张速度越小。观察图 13a) 流线图可看出,不同特征位置处前发射弹空泡扩张速度不同,对不同特征位置处的后发射弹产生的影响不同, $\Delta=0.5$ 处前发射弹空泡

扩张速度较大,后发射弹 $A_{0.5}$ 弹尖内侧流体受到剧烈挤压形成回流,随着射弹前后间距逐渐增加, $\Delta = 1.0$ 处前发空泡扩张速度减小,后发弹尖内侧回流现象随之减弱,当 Δ 增大到 2.0 和 3.0 时,由于前发空泡扩张速度已衰减至很小,后发弹尖内侧排开流体运动未受到前发射弹的阻碍,同时在前发射弹空泡内部低压区的促进作用下,流速相对较快。由图 13a) 弹尖压力图可发现,不同工况下后发射弹弹尖压力由于流体运动影响均呈不对称分布,弹尖内外两侧的压力差形成了促使弹丸失稳旋转的偏转力 F_p , $\Delta = 0.5$ 时内侧流速较小导致 $A_{0.5}$ 弹尖内侧压力较大,偏转力 F_p 指向射弹外侧; $\Delta = 1.0$ 时由于阻碍作用减小, $A_{1.0}$ 弹尖两侧压力基本对称,偏转力 F_p 的大小约等于零;而 $\Delta = 2.0$ 和 3.0 时内侧流体流速加快,导致 $A_{2.0}$ 、 $A_{3.0}$ 弹尖内侧所受压力减小,偏转 F_p 指向射弹内侧。如图 15 所示,偏转力 F_p 会产生偏转力矩,最终导致后发射弹在 $\Delta = 0.5$ 时向射弹内侧偏转; $\Delta = 1.0$ 时偏转幅度很小,射弹运动基本平稳; $\Delta = 2.0$ 和 3.0 时向射弹外侧偏转。

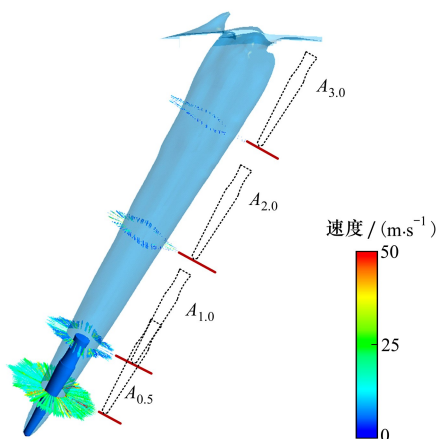


图 14 上侧射弹先入水时空泡壁不同特征位置 ($\Delta = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0$) 处截面速度矢量图

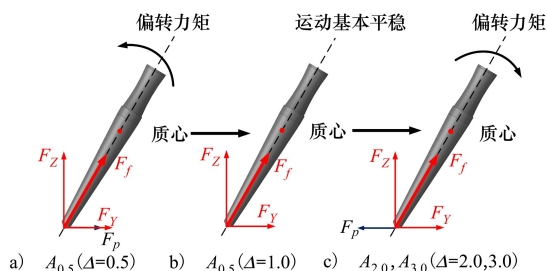


图 15 上侧射弹先入水时发射弹受力偏转示意图

2.2 异步并联斜入水运动特性分析

为分析射弹运动过程中的稳定性,定义无量纲偏转角 K_{deg} ,表达式为

$$K_{\text{deg}} = \left| \frac{\theta}{\beta} \right| \quad (6)$$

式中: θ 为射弹运动过程中的偏转角; β 为射弹初始入水角度。

横向阻力系数 C_y 定义为

$$C_y = \frac{F_y + F_p}{\frac{1}{2} \rho_w V_0^2 A_1} \quad (7)$$

式中: F_y 为射弹在 Y 方向所受流体阻力; F_p 为射弹所受偏转力; ρ_w 为水的密度; V_0 为射弹入水速度; A_1 为射弹侧截面面积;

图 16 ~ 17 分别为不同入水顺序下前发射弹的无量纲偏转角 K_{deg} 变化曲线、横向阻力系数 C_y 变化曲线和无量纲偏转角 K_{deg} 随 Δ 的变化曲线。可以发现对于前发射弹而言,只有在 $\Delta = 0.5$ 时,无量纲参数 K_{deg} 和横向阻力系数曲线呈现较大的非线性变化趋势,其他工况下曲线变化与单发斜入水基本一致,射弹运动平稳。通过对比不同入水顺序下 $\Delta = 0.5$ 时前发射弹运动曲线变化规律还可以发现,当上侧射弹入水发生沾湿后,其偏转角持续增大,相应的横向阻力系数也不断增大;而下侧射弹入水沾湿后,其偏转角同样持续增大,但其横向阻力系数变化曲线不是持续增大的,而是在 0.63 ms 和 1.63 ms 左右有 2 次峰值,且第二次峰值时横向阻力系数变化的绝对值大于第一次峰值的绝对值。结合前文分析其原因,当 $\Delta = 0.5$ 且上侧射弹先入水时,前发射弹在入水后 0.23 ms 左右即发生沾湿,而此时前发射弹自身稳定性较差,导致其发生持续沾湿,横向阻力系数不断增大,最终失稳;而下侧射弹先入水时,其在入水后 0.63 ms 左右发生沾湿,但此时射弹自身稳定性较强,故未直接失稳,而是在 1.43 ms 左右第二次沾湿后稳定性被破坏,最终持续沾湿失稳。图 17b) 中下侧射弹先入水时的 2 次峰值分别对应射弹的前后 2 次沾湿,第二次峰值时横向阻力系数变化的绝对值更大的原因是射弹在第二次沾湿前的偏转过程中积攒了更多的惯性势能,更大的惯性势能最终也导致射弹稳定性被破坏,射弹持续沾湿失稳,横向阻力系数持续增大。

由于不同入水顺序下前发射弹偏转角变化规律 $\Delta = 0.5$ 与 $\Delta = 1.0, 2.0$ 和 3.0 存在显著区别,为深入

分析两射弹前后间距对前发射弹运动稳定性的影响规律,增加了 $\Delta = 0.6, 0.8, 1.5$ 和 2.5 的工况,并提取了各工况下前发射弹的偏转角,如图 16c) 和图 17c) 所示。图 16c) 和图 17c) 为不同入水顺序下前发射弹偏转角随 Δ 的变化曲线,包括 5 个不同的入水时刻 ($t_1 = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ ms)。由于射弹大幅度偏转后会失稳,数值仿真停止,因此图中部分入水时刻数据点缺失。观察 16c) 和图 17c) 可发现,随着 Δ 的增大,不同入水顺序下前发射弹偏转角逐渐

减小至曲线平稳。其中 $\Delta = 1.0$ 为前发射弹偏转角变化曲线的转折点,即当 $\Delta \geq 1.0$ 时,前发射弹偏转角基本一致且较小,同时随着入水时间的增加,偏转角增长缓慢;而当 $\Delta < 1.0$ 时,前发射弹偏转角随着 Δ 的减小而逐渐增大,且随着入水时间的增加,偏转角增长速度较快。值得注意的是,当下侧射弹先入水时,前发射弹偏转角增长速度相较于上侧射弹先入水时较慢。

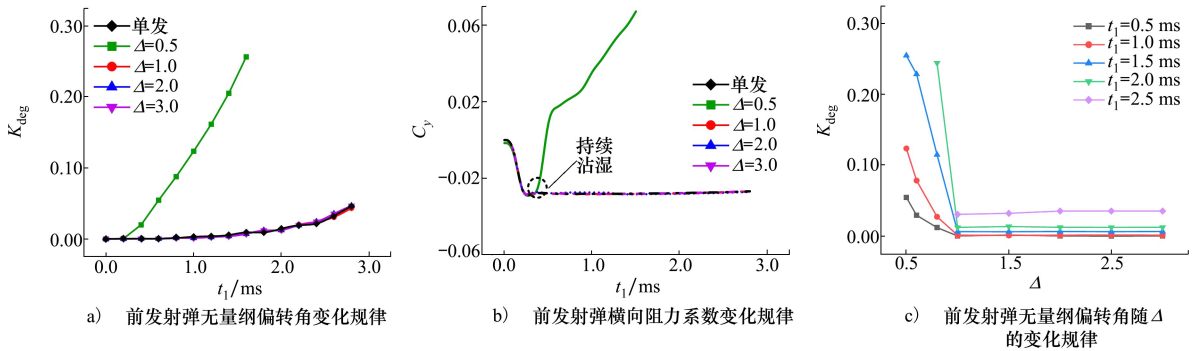


图 16 上侧射弹先入水时前发射弹运动变化规律

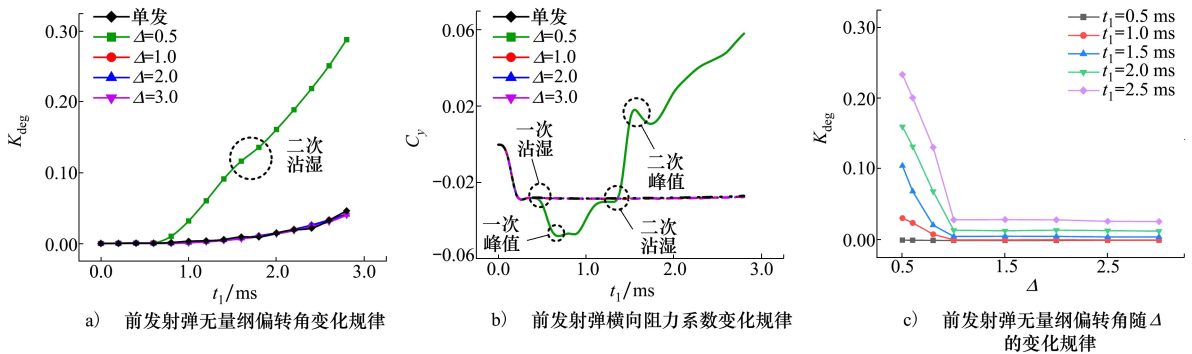


图 17 下侧射弹先入水时前发射弹运动变化规律

综合前后文分析,可得出以下结论:当 $\Delta \geq 1.0$ 时,前发射弹偏转角均较小,运动稳定性良好; $\Delta < 1.0$ 时,前发射弹偏转角均较大,其中下侧射弹先入水时,前发射弹发生失稳的时间较上侧射弹先入水时更晚,其稳定性稍好。

图 18 和图 19 为不同入水顺序下后发射弹的无量纲偏转角 K_{deg} 变化曲线、横向阻力系数 C_y 变化曲线和无量纲偏转角 K_{deg} 随 Δ 的变化曲线,定义后发射弹尖接触水面时 $t_2 = 0$,下面对不同工况下后发射弹的偏转原因进行分析。

对比图 17 和图 18 中不同入水顺序下后发射弹的无量纲偏转角可以看出,当 $\Delta = 1.0$ 时,不同入水

顺序下后发射弹与单发射弹斜入水基本一致,弹丸偏转角均较小且运动平稳;当 $\Delta = 0.5$ 时,相较于下侧射弹先入水,上侧射弹先入水时后发射弹偏转角变化幅度更大;而当 $\Delta = 2.0$ 和 3.0 时,下侧射弹先入水时后发射弹偏转角变化幅度更大。综合前文图 13 和图 15 进行分析,由前文可知上侧射弹先入水时, $\Delta = 0.5$ 工况下后发射弹所受 F_p 的方向与射弹所受流体阻力 Y 方向分量 F_Y 方向相同, $\Delta = 2.0$ 和 3.0 工况下 F_p 与 F_Y 方向相反;而下侧射弹先入水时,后发射弹在不同工况下所受 F_p 的方向与上侧射弹先入水时相反,即 $\Delta = 0.5$ 时后发射弹所受 F_p 与 F_Y 方向相反, $\Delta = 2.0$ 和 3.0 时 F_p 与 F_Y 方向相同。方向相

反时力会相互抵消,反之则不会。两力的相互抵消作用会导致此时后发射弹所受偏转力矩减小,后发射弹偏转角减小,进而导致 $\Delta = 0.5$ 时上侧射弹先入水时的后发射弹偏转角更大,而当 $\Delta = 2.0$ 和 3.0 时下侧射弹先入水的后发射弹偏转角更大。

通过对比图 18b) 和图 19b), 可观察到不同入水顺序下后发射弹横向阻力系数变化规律与上文分析基本一致,即随着 Δ 从 0.5 增大到 3.0 ,上侧射弹先入水时,后发射弹所受 F_p 与 F_y 的方向由相同变为相反,导致后发射弹横向阻力系数逐渐减小;而下侧射弹先入水时,后发射弹所受 F_p 与 F_y 的方向由相反变为相同,后发射弹横向阻力系数逐渐增大。

图 18c) 和图 19c) 给出了后发射弹在 5 个不同入水时刻($t_2 = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ ms) 偏转角随 Δ

的变化曲线,可以明显观察到随着 Δ 的增大,2 种入水顺序后发射弹偏转角均呈先减小后增大的趋势,其中 $\Delta = 1.0$ 为后发射弹偏转角的极小值点;对于其他工况,当 $\Delta < 1.0$ 时,上侧射弹先入水时后发射弹偏转角随时间的增长速度较下侧射弹先入水时更快,偏转角更大;当 $\Delta > 1.0$ 时,下侧射弹先入水时后发射弹偏转角增长速度更快,偏转角更大。

综上所述,对于后发射弹来说, $\Delta = 1.0$ 为后发射弹偏转角的极小值点,不同入水顺序下后发射弹均运动平稳,其他工况下后发射弹均发生偏转;当 $\Delta < 1.0$ 时,下侧射弹先入水时后发射弹偏转角较上侧射弹先入水时更小,运动稳定性较好;而当 $\Delta > 1.0$ 时,上侧射弹先入水时后发射弹偏转角较小。

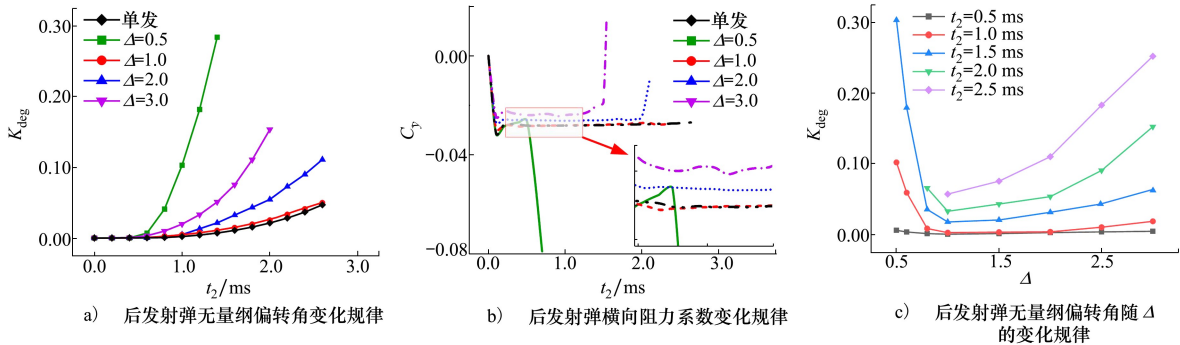


图 18 上侧射弹先入水时后发射弹运动变化规律

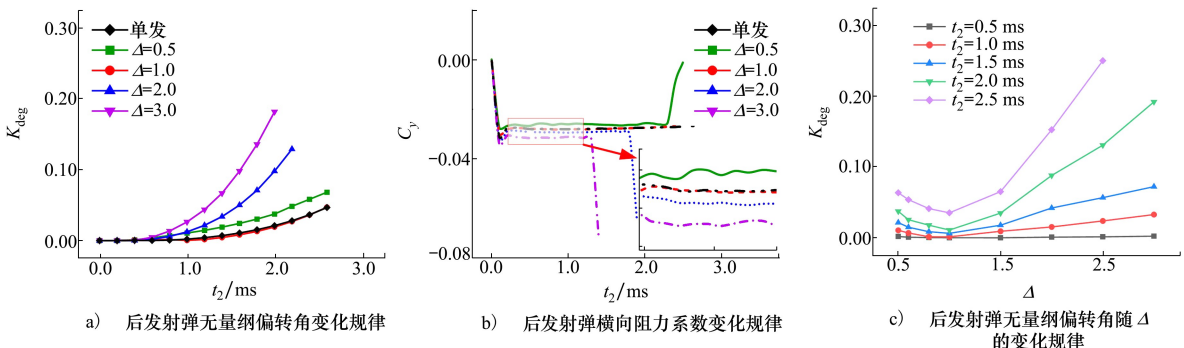


图 19 上侧射弹先入水时后发射弹运动变化规律

3 结 论

本文以超空泡射弹异步并联倾斜入水问题为探究对象,运用数值模拟的方法分别对不同工况下前后两弹丸的空泡演化及运动特性进行了对比分析,

研究了异步并联射弹初始前后间距和入水顺序的不同对弹丸入水特性的影响规律,主要得到了以下结论:

1) 异步并联倾斜入水超空泡射弹的初始前后间距对射弹空泡演化影响明显。超空泡射弹异步并联倾斜入水时,后发射弹会对前发射弹内侧空泡形

成挤压,导致前发射弹空泡不对称,同时后发射弹空泡在前发射弹空泡内部低气压的正激励作用下,空泡向射弹内侧扩张。随着 Δ 从 0.5 增加至 3.0,前发射弹附近空泡受后发射弹空泡的影响逐渐减弱,而后发射弹附近空泡受前发射弹空泡的影响持续存在。

2) 异步并联倾斜入水超空泡射弹的入水顺序对射弹空泡演化影响明显。 $\Delta = 0.5$ 时,由于射弹倾斜入水时存在水平方向速度分量,射弹入水前期背水面附近流体动能和空泡直径相较于迎水面更大,与自下侧入水相比,自上侧入水的前发射弹空泡所受后发射弹的挤压更加剧烈;随着 Δ 的增大,入水

顺序对射弹空泡演化的影响减弱。

3) 异步并联倾斜入水超空泡射弹的初始前后间距和入水顺序对射弹运动稳定性影响明显。对于前发射弹,当 $\Delta = 0.5$ 时不同入水顺序下射弹均较快发生失稳,其中前发射弹自上侧入水时,沾湿及失稳较下侧入水发生更快;随着初始前后间距的增大,2 种入水顺序下前发射弹均逐渐运动平稳。对于后发射弹,2 种入水顺序下后发射弹运动规律基本一致,在 $\Delta = 1.0$ 时偏转角最小,运动平稳;其他工况偏转角均较大,在 $\Delta = 0.5$ 时向射弹内侧偏转失稳;在 $\Delta = 2.0$ 和 3.0 时向射弹外侧偏转失稳。

参考文献:

- [1] 李佳川,魏英杰,王聪,等. 不同扰动角速度高速射弹入水弹道特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(4): 131-136
LI Jiachuan, WEI Yingjie, WANG Cong, et al. Water entry trajectory characteristics of high-speed projectiles with various turbulent angular velocity[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(4): 131-136 (in Chinese)
- [2] 陈晨,魏英杰,王聪,等. 小型运动体高速倾斜入水空泡流动数值研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(2): 334-340
CHEN Chen, WEI Yingjie, WANG Cong, et al. Computational analysis of cavity flow induced by high-speed oblique water-entry of axisymmetric body[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(2): 334-340 (in Chinese)
- [3] 宋武超,王聪,魏英杰. 运动参数对回转体倾斜入水空泡演化影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(10): 130-136
SONG Wuchao, WANG Cong, WEI Yingjie. Influence of motion parameters on the flow field characteristics of revolution body with oblique water-entry[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(10): 130-136 (in Chinese)
- [4] 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 Armamentarii, 2018, 39(7): 1364-1371 (in Chinese)
- [5] 秦杨,易文俊,管军. 超空泡射弹高速倾斜入水的空化流动数值模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(7): 99-104
QIN Yang, YI Wenjun, GUAN Jun. Numerical simulation for cavitation flow of high-speed rotating body oblique entering into water [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(7): 99-104 (in Chinese)
- [6] SHI Y, WANG G, PAN G. Experimental study on cavity dynamics of projectile water entry with different physical parameters [J]. Physics of Fluids, 2019, 31(6): 067103
- [7] 高英杰,孙铁志,张桂勇,等. 回转体高速倾斜入水的空泡演化及结构响应[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(12): 123301
GAO Yingjie, SUN Tiezhi, ZHANG Guiyong, et al. Flow characteristics and structure response of high-speed oblique water-entry for a revolution body[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(12): 123301 (in Chinese)
- [8] SONG Z J, DUAN W Y, XU G D, et al. Experimental and numerical study of the water entry of projectiles at high oblique entry speed[J]. Ocean Engineering, 2020, 211: 107574
- [9] LU L, YAN X, LI Q, et al. Numerical study on the water-entry of asynchronous parallel projectiles at a high vertical entry speed [J]. Ocean Engineering, 2022, 250: 111026
- [10] 王聪,何超杰,余德磊. 回转体并联入水运动状态预测[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(6): 21-26
WANG Cong, HE Chaojie, YU Delei. Prediction of the state of revolution bodies entering water in parallel [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(6): 21-26 (in Chinese)
- [11] 路丽睿,魏英杰,王聪,等. 双圆柱体低速并联入水过程空泡及运动特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(7): 42-49
LU Lirui, WEI Yingjie, WANG Cong, et al. Tests for cavities and motion characteristics in process of two-cylinder in parallel wa-

ter entry at low speed[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(7): 42-49 (in Chinese)

[12] 余德磊, 王聪, 何超杰. 回转体并联入水过程空泡及运动特性数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(12): 23-32

YU Delei, WANG Cong, HE Chaojie. Numerical simulation of cavitation and motion characteristics of revolution bodies entering water in parallel[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(12): 23-32 (in Chinese)

Analyzing cavity evolution and motion characteristics of asynchronous parallel oblique water-entry super-cavitating projectile

GAO Csong¹, LU Lin¹, QI Xiaobin², YAN Xuepu¹, WANG Chen²,
HU Yanxiao¹, ZHANG Dongxiao¹

(1.School of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2.School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Based on the volume of fluid multiphase flow model and the overset mesh technique, a numerical method for an asynchronous parallel oblique water-entry super-cavitating projectile was established. Experimental studies of the oblique water-entry of a high-speed single-launch projectile were carried out to validate the viability of the numerical method. The paper performed the numerical simulations and analyses of cavity evolution and motion characteristics of the front and rear projectiles in different initial intervals and in two sequences of top-side water-entry projectile first and bottom-side water-entry projectile first. The results show that when the initial interval of the first launch projectile is 0.5 time the projectile length, the first launch projectile cannot produce a cavity to completely encapsulate the projectile due to the violent squeezing of the following launch projectile cavity, and its movement is seriously affected and eventually loses its trajectory stability. At the same time, the first launch projectile that enters water from top side is squeezed to a larger degree than the one from bottom side, and the wetting phenomenon occurs earlier and loses stability faster. As the initial interval increases, the influence of the following launch projectile cavity near the first launch projectile is weakened, and the first launch projectile in both water entry sequences move steadily. For the following launch projectile, due to the continuous influence of the first launch projectile cavity, its cavity is always asymmetrical, and its motion stability is affected. The following launch projectile deflects to the inner side and destabilizes when the initial interval is 0.5 times the projectile length. When the initial interval is 1 time the projectile length, it moves steadily. It deflects to the outer side and destabilizes when the initial interval is 2 and 3 times the projectile length. In addition, the motion characteristics of the following launch projectile are basically identical in two water-entry sequences.

Keywords: super-cavitating projectile; asynchronous parallel water-entry; oblique water-entry; numerical simulation; cavity evolution; motion characteristics

引用格式:高词松, 鹿麟, 祁晓斌, 等. 超空泡射弹异步并联倾斜入水空泡演化与运动特性分析[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(1): 18-27

GAO Csong, LU Lin, QI Xiaobin, et al. Analyzing cavity evolution and motion characteristics of asynchronous parallel oblique water-entry super-cavitating projectile[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(1): 18-27 (in Chinese)