

DOI:10.11918/202409020

头部非对称运动体倾斜入水实验分析

杨乾^{1,2}, 钦波¹, 周敏超¹, 李喜喜¹, 张翱¹, 王聪²

(1. 四川航天技术研究院 四川航天系统工程研究所, 成都 610100; 2. 哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为探究非对称结构倾斜入水过程空泡形态演化与弹道特性, 针对不同非对称头型运动体入水开展实验研究。文中使用高速摄像技术对头部非对称运动体入水过程空泡演化与弹体位置进行记录。基于数字图像处理技术, 提取不同头型非对称运动体的运动轨迹及姿态, 对比分析头部形状与入水方式对入水空泡演化与弹道特性的影响。研究结果表明: 头部非对称运动体入水空泡演化具有2次开空泡、2次喷溅、1次空泡附着、空泡融合、2次空泡溃灭等独特的空泡流动特性; 运动体头部形状会严重影响入水空泡的演化和弹道特性; 随着运动体头型从凸头形状向凹头形状转变, 喷洒水幕的宽度、空泡的大小以及运动体的姿态角会逐渐增大。相反, 2次空泡的闭合时间却逐渐减小。此外, 当头部非对称运动体以反向方式入水时, 其更易达到水平运动状态, 运动体入水后达到水平运动状态的时间大幅减小, 这一特性对实际工程应用具有指导意义。

关键词: 非对称头部; 入水实验; 入水方式; 空泡; 多相流

中图分类号: TJ630

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)08-0024-10

Experimental analysis on oblique water-entry of asymmetric-headed moving bodies

YANG Qian^{1,2}, QIN Bo¹, ZHOU Minchao¹, LI Xixi¹, ZHANG Ao¹, WANG Cong²

(1. Sichuan Academy of Aerospace Technology, System Engineering Institute Sichuan Aerospace, Chengdu 610100, China;

2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To explore the cavity evolution and ballistic characteristics during the oblique water-entry of asymmetric structures, experimental research was conducted on various asymmetric-headed bodies. High-speed imaging technique was utilized to capture the cavity evolution and body position during the water-entry process of asymmetric-headed moving bodies. Utilizing digital image processing, trajectories and attitudes of these bodies were extracted. A comparative analysis was then performed to assess the impact of head shape and entry mode on cavity evolution and ballistic characteristics. The results show that the evolution of the water entry cavity of asymmetric-headed moving bodies has unique cavity flow characteristics such as secondary open cavity, secondary splashing, primary cavity attachment, cavity fusion, and secondary cavity collapse. The shape of the head of the moving body will seriously affect the evolution of the water-entry cavity and the ballistic characteristics of the moving body. As the shape of the head of the moving body changes from a convex shape to a concave shape, the width of the splash water curtain, the size of the cavity curtain, the size of the cavity and the attitude angle of the moving body will gradually increase. On the contrary, the closure time of the secondary cavity will gradually decrease. This characteristic has a profound impact on practical engineering applications.

Keywords: asymmetric head; water-entry experiment; water-entry mechanism; cavity; multiphase flow

入水是指物体从空气中穿越自由水面进入水中的过程, 这一过程中, 物体周围会形成一个与空气相连的气腔, 即入水空泡。入水现象在自然科学、工业生产、仿生科技、航空航天以及军事等多个领域均有广泛涉及, 且入水空泡对物体的运动特性和流体动力特性有着显著影响。正因如此, 入水问题引起了学术界的广泛关注。近年来, 研究人员通过大量的实验、数值计算和理论分析, 对这一问题进行了深入

研究。

Seddon 等^[1]曾对 1929—2003 年期间入水领域的主要理论、实验和数值成就进行了系统的总结。Duclaux 等^[2]则对圆球和圆柱的入水空泡进行了研究, 提出了空泡从产生到溃灭过程中形状随时间变化的近似解。Truscott 等^[3-4]、Yun 等^[5-6]通过实验方法研究了球体旋转入水现象, 发现球体旋转时流体楔会将空泡一分为二, 他们还对不同球体质量和

收稿日期: 2024-09-08; 录用日期: 2025-01-14; 网络首发日期: 2025-07-07

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250707.1335.005>

基金项目: 国家自然科学基金(123B2031)

作者简介: 杨乾(1994—), 男, 工程师; 王聪(1966—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 王聪, alanwang@hit.edu.cn

旋转速率对空泡特性的影响进行了分析,估算了球体的升力和阻力。马庆鹏等^[7]则研究了球体垂直入水时,入水速度和表面沾湿状态对空泡流动的影响,发现高速入水且空泡深闭合时,球体的运动参数及阻力因数曲线会呈现出明显的波动。郭智溥等^[8]通过数值模拟对球体垂直入水空泡内部流场特性进行了研究,发现入水冲击速度对喷溅闭合、空泡形态以及内部流场随时间的演变具有显著影响。张辰星等^[9]同样通过数值模拟,发现空泡所受到的周围流体压力是导致空泡深度闭合的主要原因。刘思华等^[10]则研究了表面湿润性对球体斜射入水过程的影响,发现不同表面湿润性的球体在入水过程中,喷溅及空泡演化与动力特性存在明显差异。

除了球体入水问题,研究人员还结合实际情况对回转体入水问题进行了大量研究。施红辉等^[11-12]通过高速相机拍照方法,对射弹高速入水进行了系统性研究,分析了空泡的形成和坍塌、自由表面的运动、飞溅、水下气泡流以及入水瞬间自由面的波动特性等现象。何春涛等^[13]则开展了单个圆柱体不同速度、不同角度入水以及两个圆柱体串列、并列入水的实验研究,分析了空泡的生成和相互之间的影响以及对运动体本身稳定性的影响。顾建农等^[14]对不同弹头不同速度水平入水进行了实验研究,分析了头型对弹道稳定性的影响以及弹头入水的速度衰减规律,并建立了相应的预测模型。卢佳兴等^[15]则通过高速摄像技术对双圆柱体并联入水过程中空泡形态进行分析,探究了弗劳德数对双空泡形态演化的影响。黄振贵等^[16]对空心弹高速斜入水弹道稳定性进行了详细研究,发现入水速度对空泡的大小和空化程度有显著影响,入水速度越高,空泡越大,空化越明显,弹体的速度衰减越快,弹道越不稳定。刘想炎等^[17]则对不同入水攻角下高速射弹的流固耦合特性进行了研究,发现随着攻角的

增大,弹体下表面与空泡壁面会逐渐产生强烈撞击,迫使空泡壁面弯曲。

然而,以往的研究大多集中在物体低速入水问题上,此时水的压缩效应影响较小。但随着入水速度的不断增大,水的压缩效应越来越明显,对回转体入水过程的影响不容忽视。因此,赵瑾浩等^[18]详细研究了水的压缩性对高速航行体入水过程的影响,发现与不考虑流体可压缩性相比,随着航行体入水速度的增加,空泡尺寸会逐渐减小,航行体阻力会增大。考虑流体可压缩性引起的空泡尺寸偏差最大可超过20%,入水运动轨迹速度方向的偏移程度最大可达1.7倍。

尽管目前对入水问题的研究已经取得了丰富的成果,但研究对象主要集中在球体、圆柱体及圆盘等对称性结构上,对于非对称结构入水问题的研究仍然相对较少。因此,本文基于高速摄像实验方法,对非对称运动体开展了低速入水实验研究,着重分析了头部非对称运动体入水空泡形态演化与弹道特性。同时,还探讨了运动体头型和入水方式等因素对非对称运动体入水空泡形态演化及入水后弹道特性的影响。本文的研究成果有望为今后研究非对称结构入水问题提供有益的参考和借鉴。

1 实验系统及实验方法

本文采用非对称头型运动体开展入水空泡实验研究。实验系统由实验水槽、光学测试系统和释放机构组成,见图1。实验水槽尺寸为1.6 m×0.9 m×0.9 m,水槽采用钢化玻璃制成,壁面厚度为10 mm,底面厚度为15 mm,各个面之间用酸性硅酮玻璃胶胶合密封。水槽底部垫设有缓冲橡胶垫,防止运动体撞击水箱底面时对其造成撞击破坏。实验所用水采用自来水,水温为22℃。实验时,使用明矾进行净化处理后注入水槽。

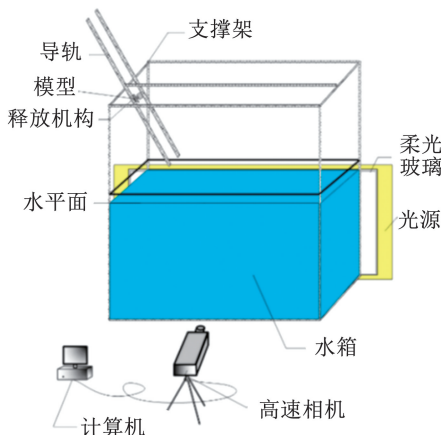


图1 实验系统

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

实验采用 4 组 LED 灯作为实验光源,布置在水槽后方,同时水槽后方布置一层磨砂玻璃用于柔化光源光线,在满足采光需求的同时,达到更好的拍照效果。实验采用 Photron FASTCAM SA-X 型高速摄像机与 Nikon AF Nikkor 28 - 85 mm 镜头配合使用,对非对称运动体入水过程进行拍摄,相机拍摄帧率为 5 000 帧/s,曝光时间 1/8 000 s。释放机构由推拉式电磁铁和导轨组成,见图 2。导轨起导向及固定作用,确保运动体未释放前位置及释放后入水角度与姿态稳定,通过调整导轨角度 β ,控制运动体入水角度。推拉式电磁铁通过开关控制,未触发开关时,推杆与导轨共同作用将运动体固定在初始位置,触发开关后,电磁铁推杆收缩,运动体在重力作用下下落。空气阻力忽略不计,通过控制运动体降落高度来控制运动体入水速度。

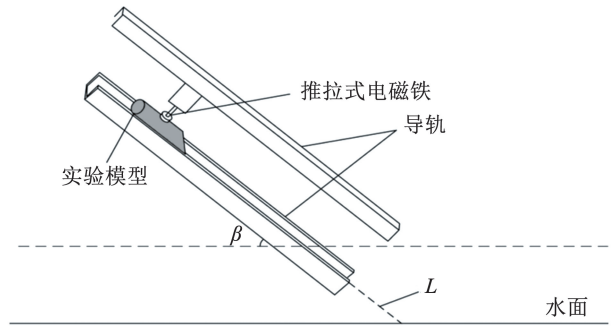


图 2 释放机构示意

Fig. 2 Schematic diagram of the release mechanism

实验采用的头部非对称结构运动体,见图 3。运动体采用铝合金加工而成, $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$, $D = 12 \text{ mm}$, $L = 70 \text{ mm}$,头型分为凹头、凸头和平头 3 种类型,头型倾角 $\alpha = 30^\circ$,其质心与转动惯量见表 1。

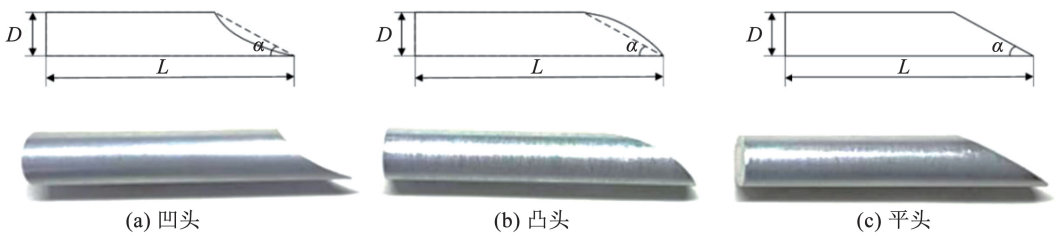


图 3 实验运动体

Fig. 3 Test moving bodies with different head shapes

表 1 模型属性

Tab. 1 Model attributes

工况	头型	质量/kg	质心/m	转动惯量(I_{xx}, I_{yy}, I_{zz})/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
1	平头	4.47×10^{-2}	4.36×10^{-2}	$(1.31 \times 10^{-5}, 2.20 \times 10^{-6}, 1.31 \times 10^{-5})$
2	凸头	4.69×10^{-2}	4.24×10^{-2}	$(1.47 \times 10^{-5}, 2.31 \times 10^{-6}, 1.47 \times 10^{-5})$
3	凹头	4.25×10^{-2}	4.49×10^{-2}	$(1.15 \times 10^{-5}, 2.10 \times 10^{-6}, 1.15 \times 10^{-5})$

实验时,将运动体接触自由液面的时刻定义为 $t = 0$ 时刻,运动体入水坐标系示意图,见图 4。 x 轴水平向右并穿过 $t = 0$ 时刻运动体质心 c , y 轴竖直向下并穿过 $t = 0$ 时刻运动体质心 c 。导轨末端延伸至水面的距离为 L (见图 2),当运动体尾部离开

导轨时,运动体头部刚好进入水中。通过提取 $t = 0$ 时刻照片数据,运动体入水角度与轨道倾角 β_0 相差小于 1%,故运动体入水角度可看做与轨道倾角 β_0 保持一致。实验将运动体按图 4(a) 入水的方式定义为正向入水,按图 4(b) 入水的方式定义为反向入水。

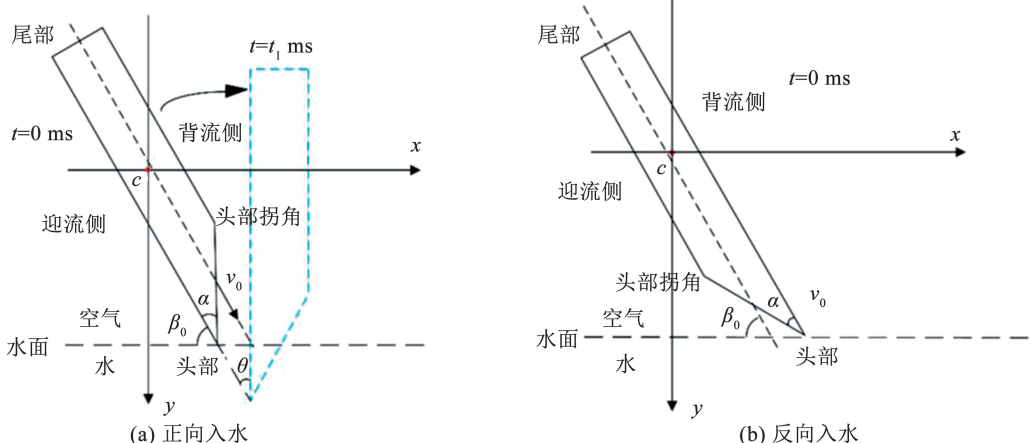


图 4 运动体入水坐标示意

Fig. 4 Schematic diagram of coordinates for water-entry moving bodies

除了研究头部非对称运动体入水空泡形态,本文参考文献[19]对圆柱体入水运动轨迹的提取算法以及对非对称运动体入水运动轨迹进行提取处理,通过对实验拍摄照片进行二值灰度处理、边缘检测、空泡识别、提取运动体姿态及质心位置,进而测量运动体质心的位移来研究非对称性结构入水弹道。考虑到运动体入水折射现象,参考路中磊等^[20-21]对运动体入水折射修正算法进行位置修正。此外,文献[19]已对该算法进行误差分析,采用此算法提取的轨迹和倾角的测量误差分别为 0.041 mm 和 0.018°,这表明该算法能够满足实验结果分析的要求。提取的运动体运动轨迹及姿态角变化等数据使用五阶样条曲线对数据点进行拟合。采用以下公式

对运动体位移和竖直运动速度进行量纲一的处理:

$$X = \frac{x}{D} \quad (1)$$

$$Y = \frac{y}{D} \quad (2)$$

$$v = \frac{dy}{dt} \frac{1}{v_0} \quad (3)$$

式中: x 、 y 分别为运动体的水平位移、竖直位移, X 、 Y 、 v 分别为量纲一的水平位移、竖直位移和竖直速度。

实验工况见表 2,分别研究了头部非对称运动体入水空泡演化及弹道特性,并分析了头型及入水方式对空泡演化与弹道特性的影响。

表 2 实验工况参数

Tab.2 Parameters of experimental conditions

工况	头型	入水速度/(m·s ⁻¹)	入水角度/(°)	入水方式	工况	头型	入水速度/(m·s ⁻¹)	入水角度/(°)	入水方式
1	平头	4.61	45	正向	4	平头	3.50	45	正向
2	凸头	4.61	45	正向	5	平头	3.50	45	反向
3	凹头	4.61	45	正向					

2 结果及分析

2.1 非对称头型运动体入水过程空泡演化及弹道特性

入水空泡演化主要分为入水撞击、流动形成、开空泡、空泡闭合、空泡溃灭 5 个阶段。实验选取平头非对称运动体在 $v_0 = 4.61 \text{ m/s}$ 、 $\beta_0 = 45^\circ$ 条件下(工况 1)开展研究,图 5、6 分别展示了平头非对称运动体入水空泡演化及入水弹道。可以发现,在平头非对称运动体入水撞击阶段($t = 0 \text{ ms}$),运动体头部与水面接触,将动能传递给自由液面,入水撞击阶段具有非常强的瞬时性。自由液面受到运动体撞击后,获得初始动能,开始沿着紧贴运动体头部斜面向上

运动并在运动体头部拐角处形成初始喷溅(运动体入水撞击水面时,在水面之上形成的一层光滑透明水幕)。由于运动体头部呈楔形结构,入水撞击时运动体与自由液面接触面积较小,传递给流体的动能较小,故在流动形成阶段初期,运动体头部入水并不会产生空泡,这一特点与圆柱倾斜入水存在明显的区别。随着运动体继续运动,运动体头部拐角处与液体撞击($t = 6 \text{ ms}$),沿运动体头部倾斜平面运动的水介质在此处发生分离,开始形成空泡。由于受初始倾角和运动体头部的影响,可以发现空泡主要出现在运动体的背流侧($t = 12 \text{ ms}$)。此时,附着在运动体迎流侧的溅水膜沿运动体表面向上运动,使得运动体迎流侧出现全部沾湿的情况。

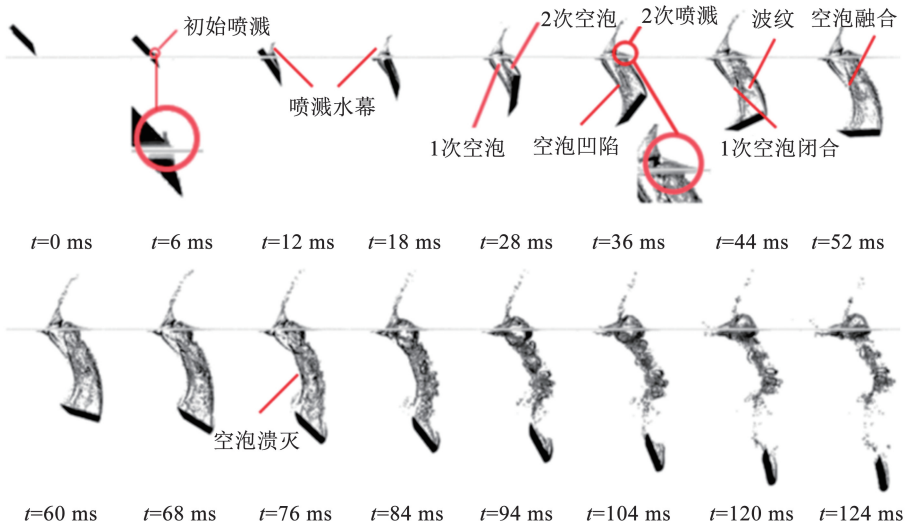


图 5 平头非对称结构倾斜入水空泡演化

Fig.5 Cavity evolution during oblique water-entry of blunt asymmetric structures

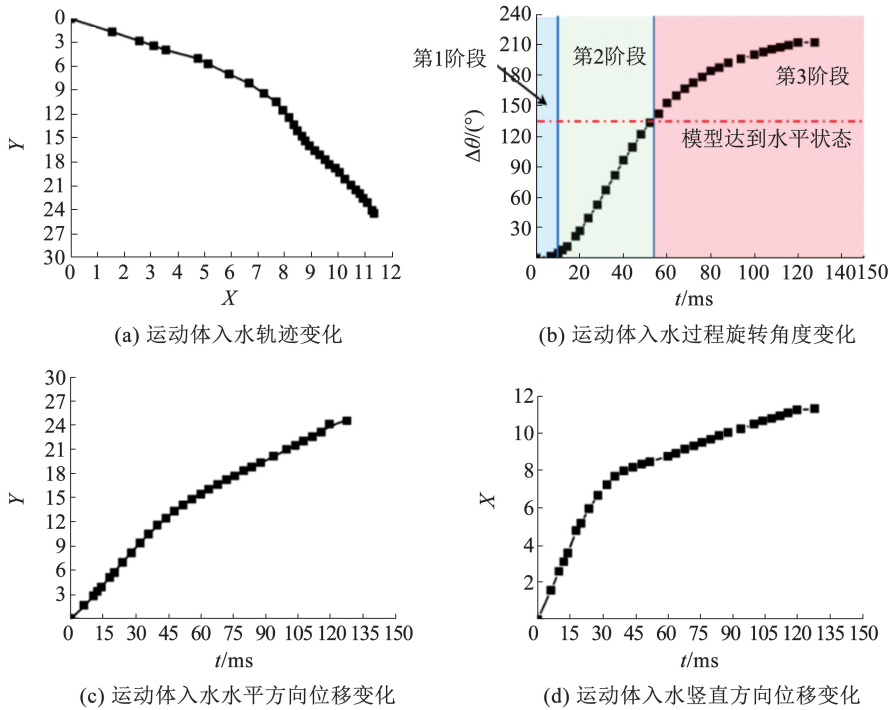


图 6 平头非对称结构运动体倾斜入水过程中的轨迹、旋转角度以及水平和竖直方向的位移随时间的变化

Fig. 6 Evolution of trajectory and rotation angle during oblique water-entry of blunt asymmetric structures

此外,在水动力作用下,运动体水平方向的速度逐渐衰减至零,并在重力及惯性的作用下,运动体做类似以头部为轴的定轴转动($t = 36 \sim 68 \text{ ms}$)。从图 6(d)中可以发现,此时运动体竖直方向的位移 Y 与时间 t 的斜率开始减小,这意味着此时运动体竖直方向的速度呈现减小趋势,图 7 也进一步说明了这一变化趋势。在此过程中,1 次空泡上半部分在空泡闭合后附着在 2 次空泡上,故并未在分离射流的作用下加速上升,而是在流体压力作用下逐渐缩小并缓慢上升($t = 44 \sim 84 \text{ ms}$)。在 $t = 76 \text{ ms}$ 时,2 次空泡右侧壁面先于左侧空泡壁发生溃灭,空泡内部空气在浮力作用下上升,致使 2 次空泡扩张并与 1 次空泡相融合($t = 84 \text{ ms}$)。2 次空泡在运动体头部处脱落($t = 94 \text{ ms}$),空泡在分离射流冲击下加速上升并溃灭,另有一小部分空泡驻留在运动体尾部,并产生波纹($t = 94 \text{ ms}, t = 104 \text{ ms}$),随后在表面张力、流体压力作用下,附着在运动体表面随运动体沉降。

进一步,本文对运动体入水过程进行受力分析,这里主要讨论运动体的旋转问题,因此只讨论运动体头部所受的压差阻力 f_b 和侧壁面受到的压差阻力 f_s 之间的关系,见图 8。在入水初期,由于运动体头部呈楔形,与液体接触的面积较小,进而导致运动体头部与液体挤压产生的压力较小,运动体头部受到的压差阻力 f_b 也比较小。同时由于运动体头部迎水侧与背水侧都呈完全沾湿状态,进而侧壁所受的压差阻力 f_s 约等于 0,因此在入水初期,运动体的旋转角度很小,图 6(b)中入水第 1 阶段也能够很好

地反映这一点。随着运动体不断向下运动,运动体楔形头部全部沾湿,且此时运动体的速度也相对较快,运动体与液体挤压作用也就越大。然而,由于运动体头部呈楔形形状,致使运动体头部所受到的压差阻力 f_b 并不会沿着运动体的弹轴方向,而是垂直于楔形斜面并指向迎流侧。因此,运动体将发生顺时针快速旋转,如图 6(b)第 2 阶段所示。随着运动体逐渐旋转,当航行体旋转超过水平状态后,运动体的旋转角速度相比第 2 阶段的旋转角速度有所减小。这主要是因为此时运动体的水平速度与竖直速度都有所减小,如图 6(c)、(d)所示,进而导致航行体与液挤压作用有所减小。又因为航行体头部呈楔形,导致所受的压差阻力并不会垂直于运动体轴线,因此此时运动体会继续以小于第 2 阶段的旋转角速度发生旋转,而不是呈竖直下落状态。

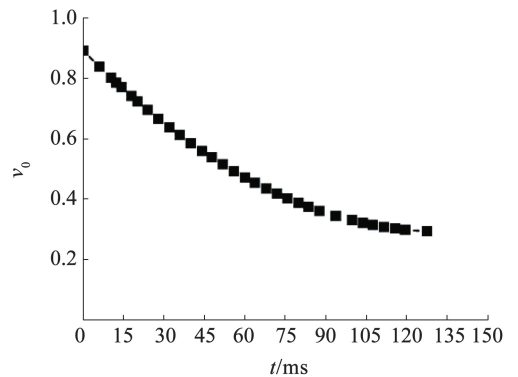


图 7 运动体竖直方向的量纲一的速度

Fig. 7 Variation of velocity in the vertical direction

总体来看,非对称头型运动体入水过程可简要概括为:第1阶段运动体入水,产生空泡及喷溅水幕,并发生小角度转动;第2阶段运动体绕头部做类

定轴转动运动;第3阶段运动体在重力及自身惯性作用下向下沉降。

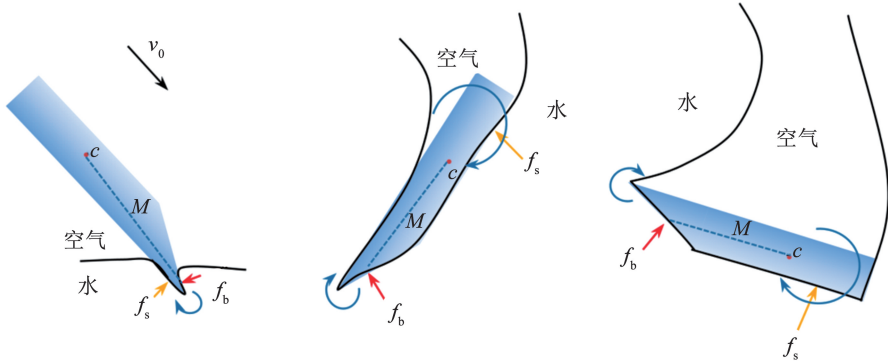


图8 头部非对称运动体倾斜入水受力示意

Fig. 8 Force diagram during oblique water-entry of an asymmetric-headed moving body

2.2 不同头型对运动体入水空泡演化及弹道特性的影响

为研究不同头型对入水空泡及入水弹道的影响,在初始条件下($v_0 = 4.61 \text{ m/s}$ 、 $\beta_0 = 45^\circ$),对平头(工况1)、凸头(工况2)、凹头(工况3)3种不同头型运动体进行了入水实验研究。不同头型运动体的入水空泡与入水弹道、水平方向位移、竖直方向位移以及旋转角度见图9、10。从图9中可以发现,当运动体全部入水后($t = 18 \text{ ms}$),凸头形状运动体的喷溅水幕较窄,平头形状运动体入水喷溅水幕相较凸

头形状运动体的入水喷溅水幕更宽,而凹头形状运动体的入水喷溅水幕只略宽于平头形状运动体的入水喷溅水幕。产生这一现象的原因主要是随着运动体头部形状逐渐向内凹陷,运动体入水时对水的撞击更大,传递给水的动能也就越大。入水喷溅水幕也就越宽,此时运动体入水时将流体向外排开幅度则更大,从而会使更多的空气进入空泡内部,在图9中也可清晰看出,平头运动体和凹头运动体入水产生的空泡较凸头运动体入水产生的空泡更宽。

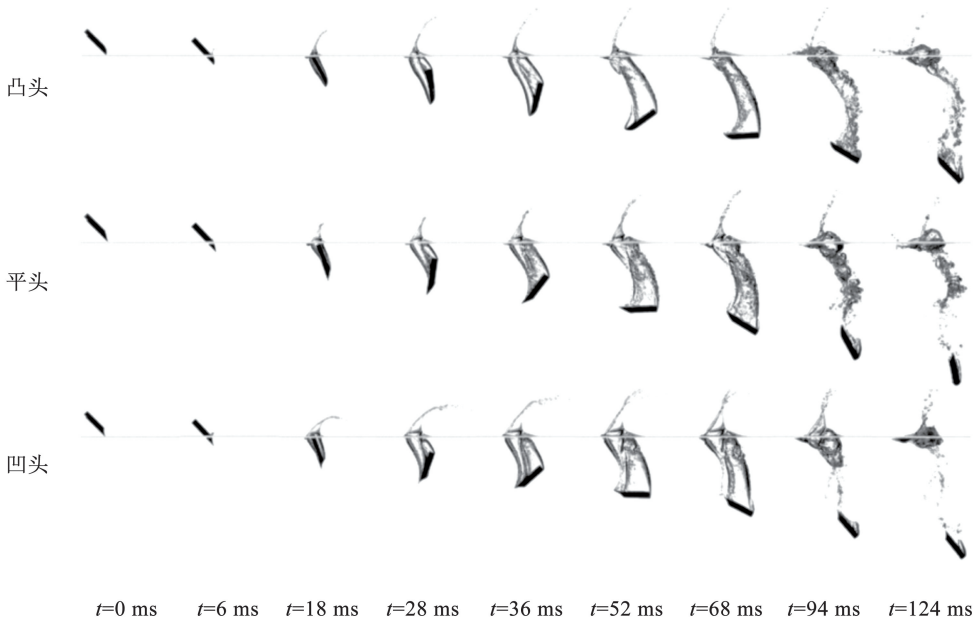


图9 不同头部形状运动体倾斜入水空泡演化

Fig. 9 Cavity evolution during oblique water-entry of moving bodies with different head shapes

当运动体入水 $t = 28 \text{ ms}$ 时,运动体开始在水动力的作用下转动并形成2次开空泡。从图9中可以看出,凹头形状运动体的旋转角度明显更大,平头形

状运动体的旋转角度次之,凸头形状运动体的旋转角度最小,此种现象从图10(b)中也能观察到。这主要是因为凸头形状运动体在顺时针转动时其头部

形状更易于液体沿表面流动,头部受到的阻力更小。相反,凹头形状运动体在顺时针转动,其头部形状会阻止水流的流动,头部所受阻力将更大,故而随着运动体头部从凸头形状变成凹头形状,运动体能够更快地调整到水平位置。当 $t = 36 \text{ ms}$ 时,运动体开始做类似绕头部的定轴转动(第 2 阶段),从图 9 中可以清晰看出头型对转动角度的影响,同时也清晰看到运动体转动导致的 2 次开空泡现象。进一步,对此阶段运动体的水平位移与竖直位移进行了定量分

析,见图 10(c)、(d)。从图 10(c)中可以发现此阶段运动体水平方向位移曲线的斜率出现了明显减小,这说明当运动体接触空泡壁面以后,由于水的阻滞作用,使得运动体的水平运动速度减小。与此同时,运动体竖直方向位移曲线的斜率也出现了明显减小。随着运动体头部从凸头形状向凹头形状转变,其竖直方向的位移斜率基本保持一致,说明此时头部形状对运动体竖直方向的运动速度影响较小。

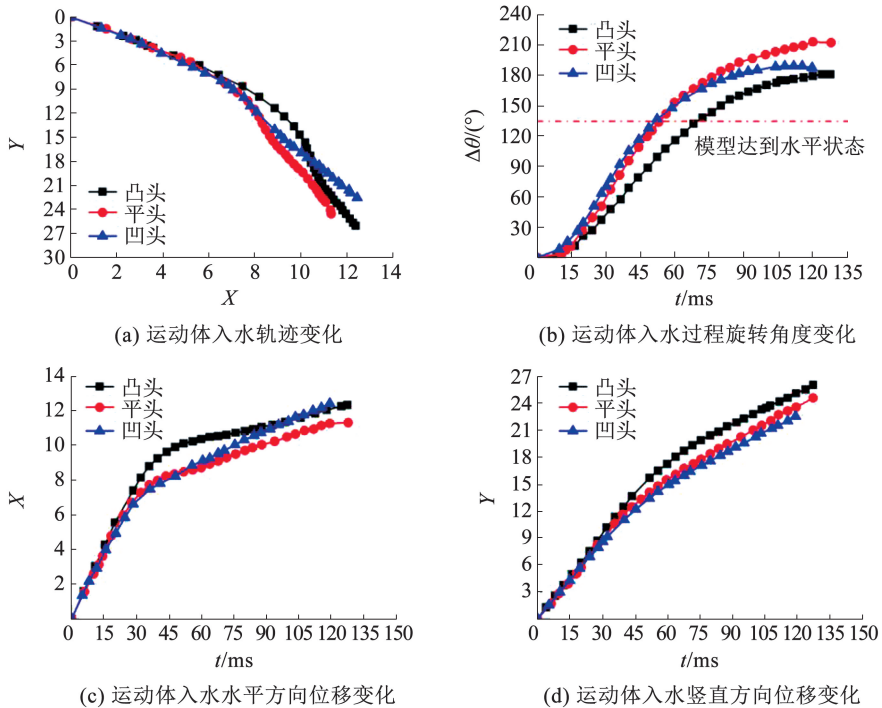


图 10 不同头部形状运动体倾斜入水轨迹及旋转角度变化

Fig. 10 Evolution of trajectory and rotation angle during oblique water-entry of moving bodies with different head shapes

当运动体入水 $t = 52 \text{ ms}$, 1 次空泡发生闭合, 2 次空泡壁面出现明显的波纹。由于不同头型运动体入水时产生喷溅水幕的高度与宽度明显不同, 凸头形状运动体入水, 1 次空泡的宽度明显小于凹头形状运动体产生的 1 次空泡, 使得凸头形状运动体入水产生的 1 次空泡最先闭合。与此同时, 可以发现 3 种头型入水产生的 2 次空泡闭合顺序与 1 次空泡闭合的顺序正好相反。凹头形状运动体的 2 次空泡最先发生闭合。这主要是因为受 1 次空泡闭合顺序的影响, 1 次空泡闭合后, 外界气体随之补充到 2 次空泡中, 致使 2 次空泡中的压力增大, 不易被外界环境液体挤压闭合。

水经历初始喷溅、开空泡、空泡凹陷以及空泡闭合等阶段, 而非对称头部运动体入水时, 也会经历上述阶段的同时, 在演化过程中还会出现 2 次空泡、2 次喷溅以及 1 次空泡与 2 次空泡融合等状态。轴对称回转体倾斜入水过程中, 空泡尺度相对比较大, 回转体始终会被空泡包裹着向下运动, 其两侧能够观察到明显的气液界面, 而非对称运动体倾斜入水时, 只会在运动体一侧观察到明显的气液界面, 另一侧大部分位置处于沾湿状态。此外, 轴对称回转体在入水过程中沿初始入水角度运动, 旋转现象不太明显, 在入水 70 ms 时, 回转体仍处于稳定向下运动状态。而非对称运动体入水时, 运动体会在水中做大幅度旋转运动, 在入水 70 ms 后, 运动体逐渐失稳。而且随着运动体进一步旋转, 还会出现运动体强烈撞击空泡壁面的现象。

进一步, 本文与宋武超等^[22]对轴对称回转体倾斜入水的研究结果进行了对比, 见图 11。从图 11 可以发现, 相比轴对称回转体入水, 非对称头部运动体入水产生的空泡特性更加复杂。轴对称回转体入

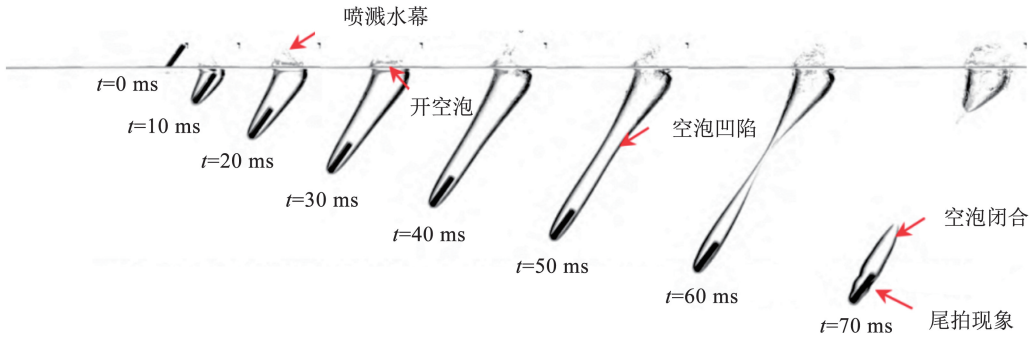


图 11 回转体倾斜入水空泡演化过程^[22]

Fig. 11 Cavity evolution during oblique water-entry of axisymmetric bodies^[22]

2.3 不同入水方式对运动体入水空泡演化及弹道特性的影响

在相同初始条件下 ($v_0 = 3.50 \text{ m/s}$, $\beta_0 = 45^\circ$), 对平头非对称运动体采用正、反两种不同方式入水的空泡演化与弹道特性进行了实验研究, 入水空泡及入水轨迹见图 12、13。正向入水方式是指运动体头部斜平面处于右上方的入水方式 (见图 4(a))。反向入水方式是指运动体头部斜平面处于左下方的入水方式 (见图 4(b))。从图 12 中可以看出, 平头形状运动体正向入水时, 运动体顺时针旋转, 而平头

形状运动体反向入水时, 其旋转方向正好与之相反。运动体旋转方向的不同, 导致运动体入水后空泡的形态有较大差别, 运动体正向入水产生的空泡在竖直方向的长度大于水平方向的长度, 而当运动体反向入水时, 产生的空泡在水平方向的长度大于竖直方向的长度。除此之外, 还可以发现运动体反向入水产生的喷溅水幕相较运动体正向入水来说更宽、更低 ($t = 28 \text{ ms}$)。更宽的喷溅水幕将导致运动体入水空泡进入的空气更多, 因此而产生的空泡宽度将越宽。

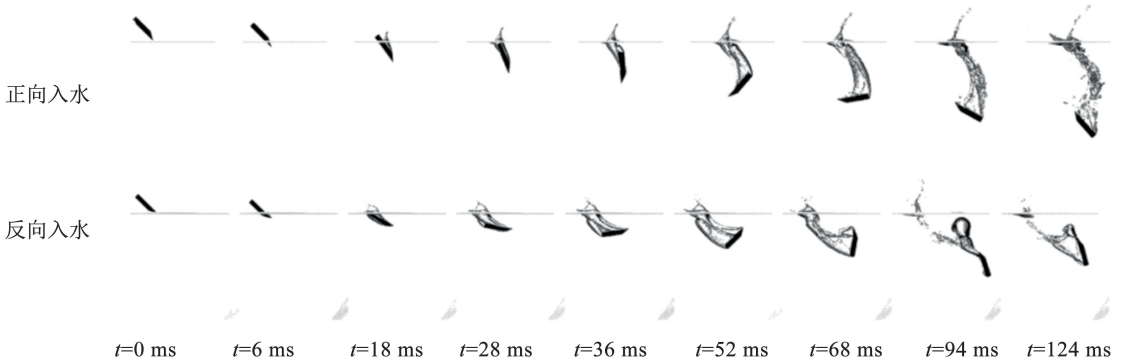


图 12 不同入水方式对入水空泡的影响

Fig. 12 Effects of water-entry modes on cavity dynamics

与此同时, 运动体以反向方式入水后, 在水动力作用下, 运动体会很快旋转至水平位置 ($t = 28 \sim 36 \text{ ms}$), 此时水平方向速度较竖直方向速度更大, 运动体入水深度相较以正向方式入水的深度更小。在运动体以反向方式入水产生的 1 次空泡闭合后, 左侧部分在分离射流作用下将加速上升并与 2 次空泡发生融合, 而右侧部分则附着在 2 次空泡上 ($t = 68 \text{ ms}$)。随着运动体继续旋转, 1 次空泡在浮力作用下将逐渐脱离运动体头部浮向水面。此时, 2 次空泡受 1 次空泡的牵引而上浮, 并在上浮的过程中, 与 1 次空泡发生融合, 共同浮出水面。

向方式入水时, 更易沿水平方向运动。通过对比运动体入水过程中运动体的运动姿态可以发现运动体以反向方式入水后, 在 30 ms 左右就已经达到水平状态, 此时运动体更容易沿水平方向运动。而运动体以正向方式入水时, 在 70 ms 左右才达到水平状态, 在此之前, 运动体则更倾向于沿竖直方向运动。但是, 无论运动体以何种入水方式运动, 运动体在 70 ms 之前运动体的旋转角度增量相差很小, 见图 13(b)。从图 13(b) 中可以发现, 当运动体以反向方式入水时, 运动体入水后更易达到水平状态, 运动体调姿的时间大幅减小, 这一特性对于实际工程应用具有较大的指导意义。

图 13 对比了不同入水方式对运动体的入水轨迹和运动姿态的影响。从图 13(a) 中可以发现, 相比运动体正向入水, 在相同运动时间内, 运动体以反

图 13(c) 对比了不同入水方式下运动体水平方向位移随时间的变化, 其斜率表示运动体水平方向

的运动速度。从图 13(c)中可以发现,在 30 ms 之前,两种入水方式运动体的水平运动速度基本相等,在 30 ms 以后,运动体以正向方式入水的水平运动速度明显小于以反向方式入水的水平运动速度,这也进一步说明运动体反向入水时更容易沿水平方向运动。最后,对两种不同入水方式竖直方向的运动特性进行了研究,见图 13(d)。从图 13(d)中可以发现,在 30 ms 之前,两种入水方式的竖直运动速度

相等,而在 30 ~ 70 ms 范围内,运动体以正向方式入水的竖直运动速度明显大于反向方式入水的竖直运动速度,这说明此时以正向方式入水的运动体更倾向于沿竖直方向运动。随后,两种入水方式的竖直运动速度基本保持一致,这主要是因为此时运动体已经完全失稳,主要依靠自身重力向下沉降。由于两者之间所受重力相等,因此此时运动体沿竖直方向的运动速度基本保持一致。

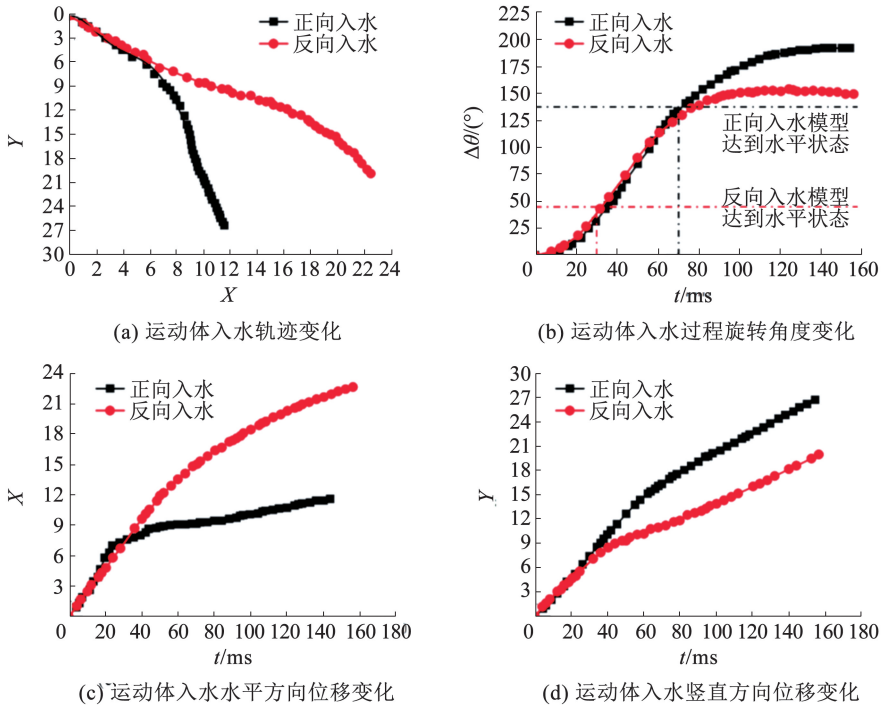


图 13 不同入水方式对运动体入水轨迹和旋转角度的影响

Fig. 13 Effects of water-entry modes on trajectory and rotation angle of moving bodies

进一步,对两种不同入水方式进行受力分析,见图 14。从图 14 中可以发现,当运动体以正向方式入水时,运动体倾斜头部将与液体相互挤压,产生压差阻力 f_b 。由于运动体头部呈非对称形状,且该倾斜平面处于右上方,因此产生的非对称压差阻力 f_b 将垂直于倾斜平面,指向斜下方。此时运动体将始

终受低头力矩 M 作用,使得运动体将沿顺时针方向旋转。而当运动体以反向方式入水时,头部倾斜平面位于左下方,倾斜平面与液体相互作用,产生垂直于倾斜平面,指向右上方的压差阻力 f_b ,运动体始终受抬头力矩 M 作用,使得运动体将沿逆时针旋转,因而运动体更容易达到水平运动状态。

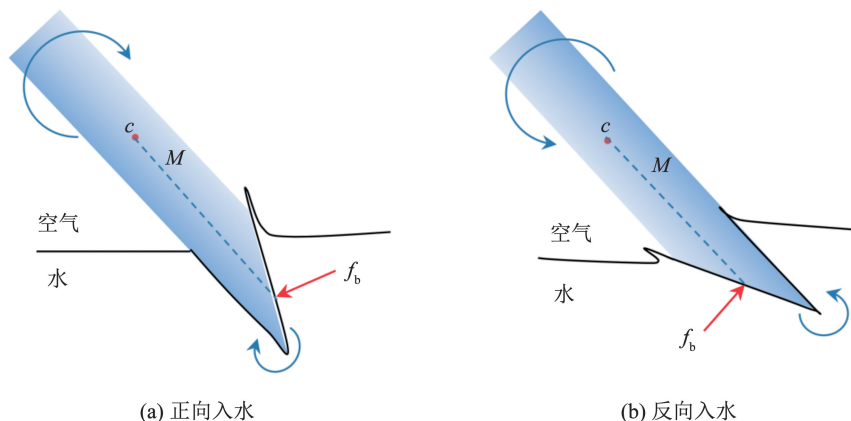


图 14 不同入水方式运动体受力示意

Fig. 14 Force diagram of moving bodies under different water-entry modes

3 结 论

1) 头部非对称运动体倾斜入水时会经历2次开空泡、2次喷溅、1次空泡附着、空泡融合、2次空泡溃灭等与轴对称运动体入水不同的空泡流动特性。

2) 运动体的头部形状会影响入水空泡的形态演化与运动特性。运动体头部从凸型向凹型变化时,其入水后喷溅水幕的宽度逐渐增大,入水空泡的宽度也逐渐增大,2次空泡闭合时间逐渐减小。在相同入水时间内,凹头运动体的旋转角度明显更大,平头运动体的旋转角度次之,凸头运动体的旋转角度最小。

3) 运动体以正、反两种方式入水后运动体旋转方向相反,反向方式入水产生的喷溅水幕更宽且低,空泡水平方向的长度大于竖直方向,与正向方式入水相反。相比正向方式入水,运动体以反向方式入水能够更快达到水平运动状态,运动体入水后的调姿时间更短,这一特性对实际工程应用具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] SEDDON C M, MOATAMEDI M. Review of water entry with applications to aerospace structures [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32 (7): 1045. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2004.09.002
- [2] DUCLAUX V, CAILLÉ F, DUEZ C, et al. Dynamics of transient cavities [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 591:1. DOI: 10.1017/s0022112007007343
- [3] TRUSCOTT T T, TECHET A H. Water entry of spinning spheres [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, 625: 135. DOI: 10.1017/s0022112008005533
- [4] TRUSCOTT T T, TECHET A H. A spin on cavity formation during water entry of hydrophobic and hydrophilic spheres [J]. *Physics of Fluids*, 2009, 21 (12): 121703. DOI: 10.1063/1.3272264
- [5] YUN Honglu, LYU Xujian, WEI Zhaoyu. Experimental study on vertical water entry of two tandem spheres [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 201: 107143. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107143
- [6] YUN Honglu, LYU Xujian, WEI Zhaoyu. Experimental study on oblique water entry of two tandem spheres with collision effect [J]. *Journal of Visualization*, 2020, 23 (1): 49. DOI: 10.1007/s12650-019-00602-4
- [7] 马庆鹏, 何春涛, 王聪, 等. 球体垂直入水空泡实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34 (2): 174. MA Qingpeng, HE Chuntao, WANG Cong, et al. Experimental investigation on vertical water-entry cavity of sphere [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34 (2): 174. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1455.2014.02.007
- [8] 郭智溥, 黄彪, 吴钦, 等. 球体垂直入水空泡内部流场特性的数值模拟研究 [J]. *船舶力学*, 2024, 28 (8): 1141. GUO Zhipu, HUANG Biao, WU Qin, et al. Numerical investigation on the flow structures during vertical water-entry of a sphere [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2024, 28 (8): 1141. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.08.002
- [9] 张晨星, 谷立祥, 权晓波, 等. 基于数值仿真的球体垂直入水空泡演化过程研究 [J]. *导弹与航天运载技术 (中英文)*, 2024 (1): 10. ZHANG Chenxing, GU Lixiang, QUAN Xiaobo, et al. Numerical investigation on the evolution of vertical water-entry cavity of a sphere [J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2024 (1): 10. DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20240103
- [10] 刘思华, 李利剑, 朱晋, 等. 表面润湿性对球体斜射入水过程

- 的影响研究 [J]. *力学学报*, 2024, 56 (4): 960. LIU Sihua, LI Lijian, ZHU Jin, et al. Influence of surface wettability on the process of oblique water entry of sphere [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, 56 (4): 960. DOI: 10.6052/0459-1879-23-461
- [11] 施红辉, 周浩磊, 吴岩, 等. 伴随超空泡产生的高速细长体入水实验研究 [J]. *力学学报*, 2012, 44 (1): 49. SHI Honghui, ZHOU Haolei, WU Yan, et al. Experiments on water entry of high-speed slender body and the resulting supercavitation [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2012, 44 (1): 49
 - [12] 陈波, 彭立兵, 施红辉, 等. 细长体出水动力学的实验研究及数值模拟 [J]. *实验流体力学*, 2015, 29 (2): 26. CHEN Bo, PENG Libing, SHI Honghui, et al. Experimental and numerical study on hydrodynamic characteristics in water-exit of slender body [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, 29 (2): 26. DOI: 10.11729/syltx20140050
 - [13] 何春涛, 王聪, 何乾坤, 等. 圆柱体低速入水空泡试验研究 [J]. *物理学报*, 2012, 61 (13): 281. HE Chuntao, WANG Cong, HE Qiankun, et al. Low speed water-entry of cylindrical projectile [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61 (13): 281. DOI: 10.7498/aps.61.134701
 - [14] 顾建农, 张志宏, 王冲, 等. 旋转弹头水平入水空泡及弹道的实验研究 [J]. *兵工学报*, 2012, 33 (5): 540. GU Jiannong, ZHANG Zhihong, WANG Chong, et al. Experimental research for cavity and ballistics of a rotating bullet entraining water levelly [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33 (5): 540
 - [15] 卢佳兴, 魏英杰, 王聪, 等. 圆柱体并联入水过程空泡演化特性实验研究 [J]. *力学学报*, 2019, 51 (2): 450. LU Jiaxing, WEI Yingjie, WANG Cong, et al. Experimental study on cavity evolution characteristics in the water-entry process of parallel cylinders [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51 (2): 450. DOI: 10.6052/0459-1879-18-288
 - [16] 黄振贵, 范浩伟, 那晓冬, 等. 空心弹高速斜入水弹道稳定性研究 [J]. *力学学报*, 2024, 56 (9): 2579. HUANG Zhengui, FAN Haowei, NA Xiaodong, et al. Study on the ballistic stability of hollow projectile during high-speed oblique water entry [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, 56 (9): 2579. DOI: 10.6052/0459-1879-24-111
 - [17] 刘想炎, 于楠, 黄振贵, 等. 不同入水攻角下高速射弹的流固耦合特性 [J]. *兵工学报*, 2024, 45 (10): 3415. LIU Xiangyan, YU Nan, HUANG Zhengui, et al. Characteristics of fluid-structure interaction of high-speed projectile at different angles of attack during water entry [J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45 (10): 3415. DOI: 10.12382/bqxb.2024.0007
 - [18] 赵瑾浩, 崔乃刚, 刘晓健, 等. 水可压缩性对高速航行体入水过程的影响 [J]. *兵器装备工程学报*, 2024, 45 (6): 74. ZHAO Jinhao, CUI Naigang, LIU Xiaojian, et al. Influence of water compressibility on the entry process of high-speed projectile [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2024, 45 (6): 74. DOI: 10.11809/bqzbgxb2024.06.011
 - [19] 夏维学. 圆柱体入水复合运动多相流动特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020. XIA Weixue. Study on multiphase flow characteristics in water-entry compound movement of cylinders [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2020.005032
 - [20] 路中磊. 开放空腔壳体入水过程多相流动特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. LU Zhonglei. Study on multiphase flow during water entry of semi-closed cylinder [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017
 - [21] 路中磊, 魏英杰, 王聪, 等. 开放空腔壳体入水扰动流场结构及空泡失稳特征 [J]. *物理学报*, 2017, 66 (6): 154. LU Zhonglei, WEI Yingjie, WANG Cong, et al. Experimental and numerical investigation on the flow structure and instability of water-entry cavity by a semi-closed cylinder [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66 (6): 154. DOI: 10.7498/aps.66.064702
 - [22] 宋武超, 王聪, 魏英杰, 等. 回转体倾斜入水空泡及弹道特性实验 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42 (11): 2386. SONG Wuchao, WANG Cong, WEI Yingjie, et al. Experiment of cavity and trajectory characteristics of oblique water entry of revolution bodies [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42 (11): 2386. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2015.0690