

# 非对称头型对航行器入水空泡及弹道特性影响的实验研究

华扬, 施瑶, 潘光, 黄桥高

(西北工业大学 航海学院, 陕西 西安, 710072)

(西北工业大学无人水下运载技术重点实验室, 陕西 西安, 710072, Email: [shiyao@nwpu.edu.cn](mailto:shiyao@nwpu.edu.cn))

**摘要:** 本论文的主要研究工作是研究非对称异构头型对航行器入水空泡及弹道特性的影响规律, 通过开展不同构型头型的航行器入水冲击试验, 揭示在佛汝德数 62~322 范围条件下入水空泡生成演变机理、入水弹道变化特性。实验采用了高速摄影的方法, 研究了同一切距下分别是 35°, 40°, 45° 三种不同切角的头型的航行器在 5~12m/s 的不同冲击速度和 60°, 70°, 80° 和 90° 的不同冲击角度下入水后的弹道轨迹和入水空泡的演变过程。研究结果表明: 带有非对称异构头型的航行器入水后的弹道轨迹出现了较大幅度的偏转, 偏转幅度的大小主要与航行器的头型, 入水角度, 入水速度相关。在同一入水角和入水速度下, 头型切角更小的航行器弹道偏转更加显著; 在不同实验工况下, 航行器姿态角随时间的变化遵循抛物线变化规律; 不同切角的非对称异构头型的航行器入水带空泡能力不同, 切角越小, 带空泡能力越强; 在同一入水角和入水速度下, 头型切角更小的航行器在斜入水时形成的开口空腔的直径更大; 不同切角的非对称异构头型的航行器入水空泡稳定性存在差异, 切角越小, 其入水空泡稳定性越差, 空泡更容易溃灭。

**关键词:** 非对称头型; 入水; 空泡; 弹道; 实验研究

## 1 引言

在水下武器的发展趋势中, 如何缩短从发现目标到打击目标的时间是人们一直以来的追求。在空投鱼雷的初期入水阶段中, 由于周围复杂流场的非定常性, 可能出现入水跳弹、反转或者沉底的现象, 因此保证航行器入水过程后的水平稳定有着重要的意义。同时, 在入水初期水轨迹阶段, 由于入水空泡的存在, 航行器只有头部与流体相接触, 而不能提供合适的起姿态稳定作用的恢复力矩, 所以空投鱼雷从入水阶段到开始水平航行阶段的过渡时间较长, 因此如何缩短这一段时间显得极为迫切而必要。

第二次世界大战期间, 由于许多入水导弹和鱼雷会出现弹跳、忽扑、沉底等失稳弹道, 影响武器的打击效果, 因此许多研究者展开了对入水弹道问题的研究与分析。E.G. Richardson<sup>[1]</sup>研究了小球倾斜入水后的弹跳现象以及其入水载荷。A. May<sup>[2]</sup>总结了相关入水问题的成果, 分析了入水导弹在零攻角下的入水冲击载荷、空泡演变和弹道轨迹等问题。

国内对入水问题的研究起步较晚, 但是近年来, 许多国内研究者对入水问题进行了大量的研究。顾建农等<sup>[3]</sup>利用数字式高速录像机实验研究了头部为半球形的弹头与手枪普通制式弹头在两个水深、6种速度下水平入水时的空泡及弹道特征。表明弹头形状对弹头空泡与入水弹道的稳定性有着重要影响。王云等<sup>[4]</sup>利用高速摄像机拍摄了弹体入水过程和空泡形态演变过程, 并分析了头型、入水角、入水速度对水下弹道的影响, 发现入水角对弹道影响比较显著, 小的入水角条件下弹体迅速向水面偏转, 而入水角增大到一定程度时弹道向缸体底部偏转。

本研究工作侧重于研究非对称异构头型对航行器入水空泡及弹道特性的影响规律, 基于现阶段的实验平台, 通过开展不同构型头型的航行器入水冲击试验, 揭示不同条件下入水弹道变化特性和水空泡生成演变机理, 以期入水弯曲弹道设计提供一定的参考。

## 2 实验研究

### 2.1 实验装置

本文所做模型入水实验的实验装置示意图如图1, 实验装置由空气炮发射装置、水箱、高速摄像系统和照明系统组成。

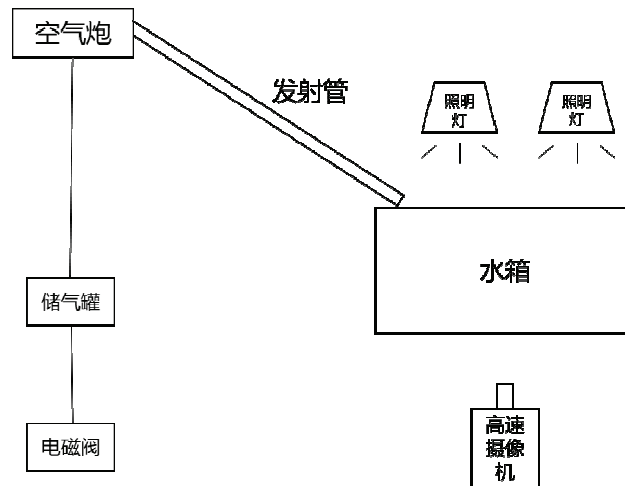


图1 实验装置示意图

实验所用水箱, 主体由有机玻璃黏合而成, 四周壁面透明, 便于高速摄像机拍摄实验

过程。水箱框架由钢架焊接而成，可以防止因为水压而导致水箱破裂。水箱的尺寸为  $1840\text{mm} \times 1200\text{mm} \times 1240\text{mm}$ ，有机玻璃的厚度为  $20\text{mm}$ 。由于实验模型以较高速度入水，模型触底后会对水箱底面造成较大的冲击力，因此在水箱底部铺有多层橡胶垫以缓冲冲击力。为了方便后续试验工况的数据处理和尺寸校准，在水箱后方的有机玻璃上粘贴了方格纸，每个方格的尺寸为  $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 。实验所用空气炮发射装置的运行过程为：打开充气开关，空气被空压机压缩后通过通气管路和压力调节阀运送至储气罐，通过安置在发射架上的数字压力表以得知此时储气罐内的压强大小，当储气罐内的压强增加到实验预设值时，关闭压力调节阀停止供气。按下电磁阀开关，常闭电磁阀打开，储气罐内的压缩气体进入发射管，推动发射管内的实验模型达到一定速度并射出管口。通过丝杠可以调节发射架的角度，以完成不同的入水角要求。

## 2.2 实验模型

由于本研究工作侧重于研究非对称异构头型对飞行器入水空泡及弹道特性的影响规律，因此设计了 3 种不同的非对称头型，使得模型入水后流体对头部质心的合力可以使得模型产生抬头力矩。

如图 2(a)所示，其中  $x$  为头型切距， $\theta$  为头型切角，在本实验中头型切距是固定值，即  $x=10\text{mm}$ ，由于带有非对称异构头型的飞行器入水时，流体对飞行器头部的作用力主要影响因素是头部切面的面积大小，因此头型切角  $\theta$  共设计了三个值分别是  $35^\circ$ ， $40^\circ$ ， $45^\circ$ ，这三种切角的头型的切面面积相差较大，实验中可以带来较为明显的差别。由于本文需要研究切角头型对入水过程的影响，为了做对照试验，因此无切角头型即平头头型也一并列入实验对象。模型实验参数如表 1 所示。

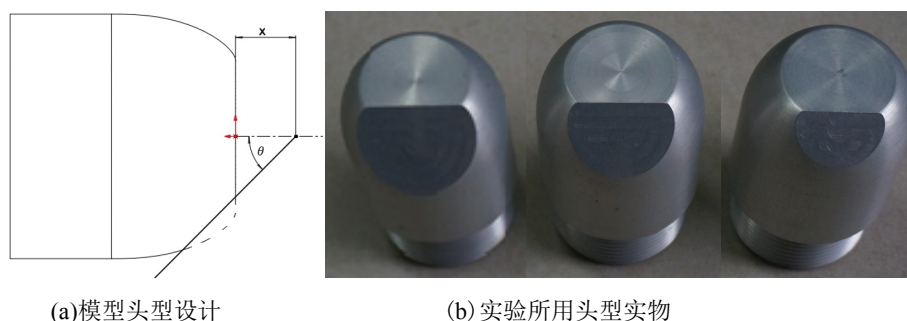


图 2 模型头型

表 1 模型实验参数

参数	参数值	参数	参数值
模型总长 $L_0$ (mm)	344	入水速度 $U_0$ (m/s)	4.93~11.25
模型直径 $D_0$ (mm)	40	佛劳德数 $Fr$	62~322
头型切距 $x$ (mm)	10	韦伯数 $We$	13314~69331
头型切角 $\theta$ ( $^\circ$ )	$35^\circ$ , $40^\circ$ , $45^\circ$	雷诺数 $Re$	195.6~446.4

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 入水空泡特性分析

在实验中，相机距离水池的距离为 4.2m，像素为 1216×1024，帧速为 2000fps，曝光时间是 200 $\mu$ s，镜头为 AF-S NIKKOR 24mm f/1.4GED。图 3(a)、图 3(b)、图 3(c)和图 3(d)分别给出了在同一入水速度  $U_0=9.76\text{m/s}$ ，同一入水角度  $\alpha=60^\circ$  下不同头型的实验模型在相同时刻下的空泡形态图。

由图 3 可以看到，带有不同头型的实验模型入水后均产生了明显的空泡现象，并且均经历了开空泡、闭空泡与空泡溃灭阶段。通过对比分析可知：带有 35°和 40°切角头型的实验模型其入水空泡的直径更大，这是因为由于头部的不对称性，导致流体对模型头部的作用力方向不通过模型的重心，因此模型入水后产生了相应的抬头力矩，弹道的抬头偏转使得模型下侧排开水的体积增大，导致其空泡直径增加。同时可以发现带有 45°切角头型的实验模型空泡直径最小，这是因为由于模型头部两侧空泡压力不对称，导致头部受到横向的压力差，以至于出现俯冲弹道，导致模型下侧排开水的体积减小，因此其空泡直径最小。平头头型的入水空泡最为稳定，其空泡闭合现象也更容易观测，而带有切角头型的模型入水后空泡不稳定，溃灭发生的时间要早于平头模型空泡溃灭发生时间，原因是带有切角头型的模型入水后弹道发生偏转，模型尾部在空泡深闭合前就开始撞击空泡壁面，导致空泡破碎，开始溃灭。

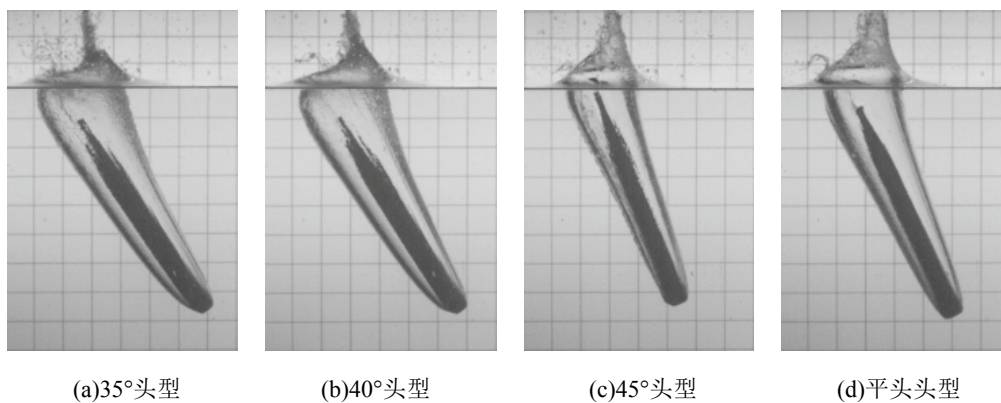


图 3 头型对空泡特征的影响

#### 3.2 入水弹道特性分析

通过编写 MATLAB 代码对实验工况进行逐帧分析，提取实验模型的轮廓信息，从而得出实验模型的弹道轨迹与姿态角的变化过程。在分析过程中，由于发现带有各个头型的实验模型质心运动轨迹接近于一条直线，弹道变化不明显，因此在本研究中选取模型头部中点轨迹来进行对比。图 4(a)、图 4(b)和图 4(c)分别给出了不同头型的模型在同一入水角下和

同一入水速度  $U_0=9.76\text{m/s}$  条件下的弹道轨迹图。可以看出，头型切角更小的航行器弹道偏转更加显著，这是因为头型切角越小，切面面积越大，流体对切面的反作用力越大，该力的方向不通过模型的重心，也就是该力垂直于模型轴线的分量越大，使模型的抬头力矩增大，因此偏转幅度越大。可以在图 4(a)发现在  $60^\circ$  入水角下， $45^\circ$  切角头型的模型弹道轨迹处于无切角头型之下，并且是一个俯冲弹道。这是因为实验模型入水后，模型头部与水接触的地方分别是头部前端平面和头部曲面，而  $45^\circ$  切角头型的模型的切角面积较小，水对切面的反作用力较小，以至于不能产生足够大的垂直于模型轴线的分量的力以供模型向上偏转，导致模型头部下侧排开水后的空泡几乎没有空气进入，下侧空泡压力略大于水蒸气压力，以至于头部两侧空泡压力不对称，在头部沿铅锤方向产生压力差，该压力差使得模型出现俯冲弹道，且该压力差的最大值为大气压力与水蒸汽压力之差。

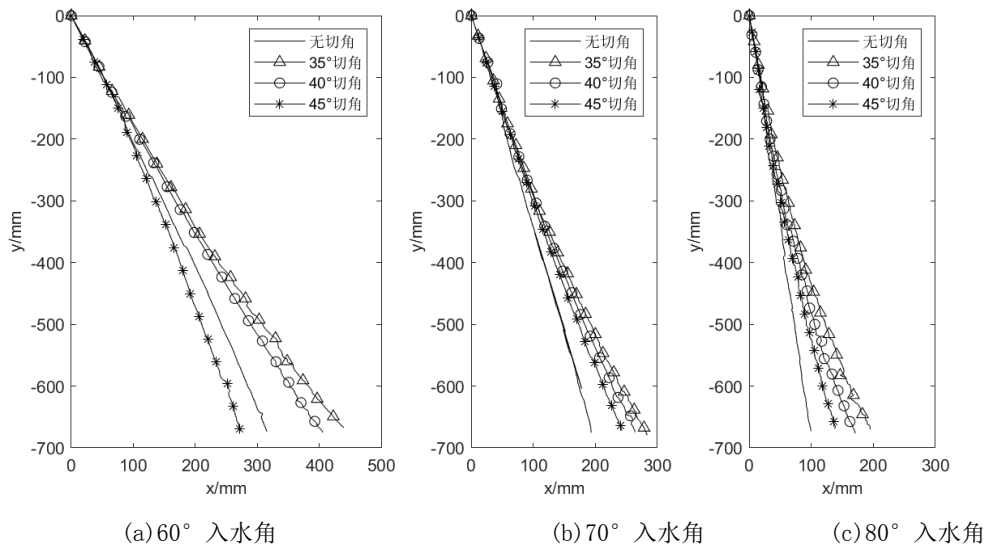


图 4 头型对弹道轨迹的影响

图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)和图 5(d)分别给出了同一入水速度  $U_0=9.76\text{m/s}$ ，不同入水角下同一头型的实验模型的弹道图。可以看到，不论何种头型，在同一入水深度下，模型的水平位移随着入水角的减小而增大；同时对于切角较小的头型的模型，入水角越小，弹道偏转幅度越大，弹道越趋向于水平。这是因为入水角越小，在同一速度入水下，速度的水平分量越大，垂直分量越小，导致入水至同一深度下，弹道偏转幅度越大。但是随着水下弹道的变长，其速度衰减也越大，因此在同一入水深度下，入水角越小，模型的速度也越小。在图 5(d)中同时还可以发现  $45^\circ$  切角头型的模型在  $60^\circ$  入水角下的入水弹道为俯冲弹道，但是在  $70^\circ$  和  $80^\circ$  入水角下的入水弹道却是抬头弹道。原因是在大入水角的情况下，模型头部两侧的空泡均有空气进入，使得模型头部两侧的空泡压力均为大气压，因此此时水对切面的反作用力的影响开始显现，垂直于模型轴线的分量的力使得模型弹道向上偏转。



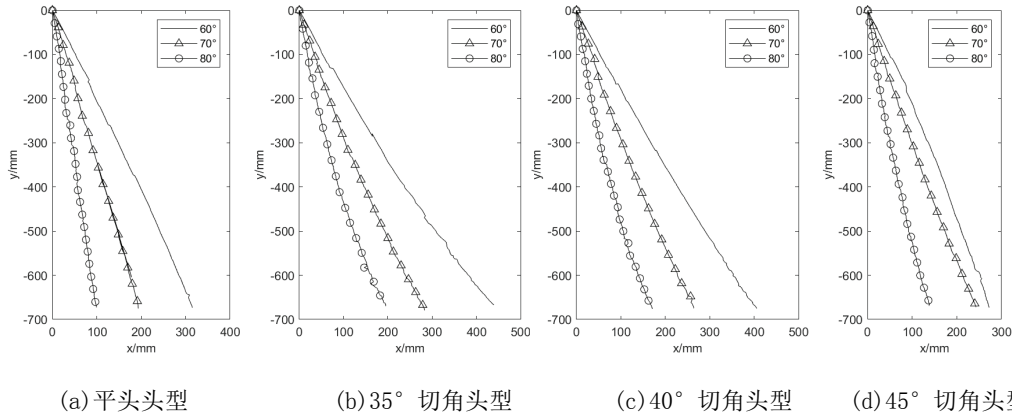


图 5 入水角对弹道轨迹的影响

图 6(a)、图 6(b)、图 6(c)和图 6(d)分别给出了在 60°入水角下，同一头型的实验模型在不同入水速度下的弹道轨迹图。可以发现入水速度越大，弹道偏转的幅度也越大，这是因为在头部切面面积相同的情况下，速度越大，水对头部的反作用力也越大，使得垂直于模型轴线的分量的力也随之增大，模型抬头力矩增加，同时加上其水平速度分量的增加，在同一入水深度下，入水速度越大的模型水平位移也更大，因此弹道偏转幅度增加。在较高速度即  $U_0=9.76\text{m/s}$  和  $U_0=12.32\text{m/s}$  入水条件下，速度对弹道的影响较小，因此两条弹道轨迹趋向一致。观察图 6(d)中 45°切角头型在  $U_0=5.01\text{m/s}$  入水条件下的弹道轨迹，可见在弹道前半段为俯冲弹道，弹道后半段为抬头弹道。出现这一现象的原因是：前半段俯冲弹道由模型头部两侧的空泡压力差所致，后半段弹道由于入水速度较小，入水空泡在入水不久后发生溃灭，模型头部与水完全接触，此时水对切面的反作用力的影响使其出现抬头弹道。

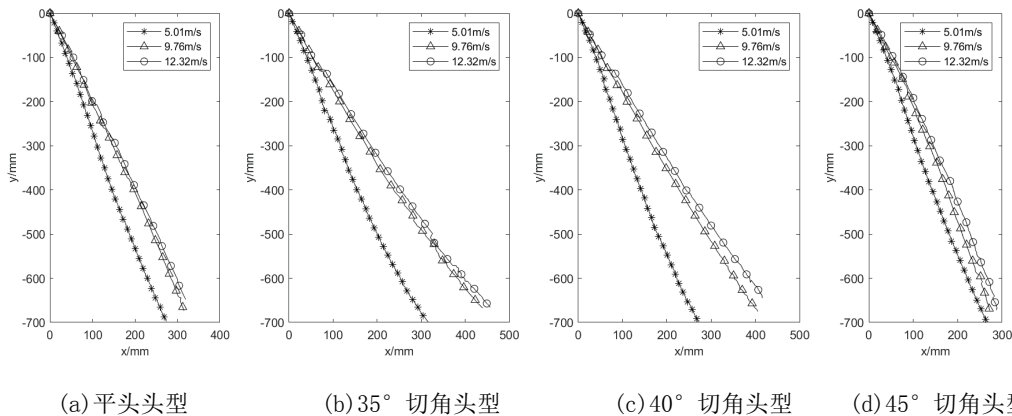


图 6 入水速度对弹道轨迹的影响

## 4 结论

本文采用实验方法研究了带有非对称异构头型的实验模型低速入水下的空泡特性和弹道特性,重点分析了不同入水速度和入水角度对空泡演变和弹道轨迹的影响。

(1) 不同切角的非对称异构头型的模型入水空泡稳定性存在差异,切角越小,其入水空泡直径越大,空泡稳定性越差,并且空泡更容易溃灭。

(2) 带有非对称异构头型的模型入水后的弹道轨迹出现了较大幅度的偏转,偏转幅度的大小主要与航行器的头型,入水角度,入水速度相关。在同一入水角和入水速度下,头型切角更小的模型弹道偏转更加显著。

(3) 平头头型和大角度切面头型的模型在一定范围内的入水角度入水后,由于存在头部两侧空泡压力差,会出现俯冲弹道。

## 参 考 文 献

- 1 Richardson E G. The impact of a solid on a liquid surface[J]. Proceedings of the Physical Society, 1948, 61(4): 352.
- 2 May A. Water entry and the cavity-running behavior of missiles[R]. Navsea Hydroballistics Advisory Committee Silver Spring Md, 1975.
- 3 顾建农, 张志宏, 王冲. 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).
- 4 王云, 袁绪龙, 吕策. 弹体高速入水弯曲弹道实验研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(12): 1998-2002.
- 5 曲宝纯. 入水研究——入水现象[J]. 舰船科学技术, 1984 (2): 1.
- 6 严忠汉. 入水弹道学研究评述[J]. 水动力学研究与进展, 1984 (2): 15.
- 7 黄凯, 乐述文. 不同头型弹体模型入水现象的实验研究[J]. 物理实验, 2016 (2016 年 05): 13-18.
- 8 李永利, 刘安, 冯金富, 等. 航行器小角度入水跳弹过程研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(10): 1860-1872.
- 9 程文鑫, 蔡卫军, 杨春武. 鱼雷小角度入水过程仿真[J]. 鱼雷技术, 2014, 22(3): 161-164.
- 10 石汉成, 蒋培, 程锦房. 头部形状对水雷入水载荷及水下弹道影响的数值仿真分析[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(10): 104-107.
- 11 韩晓东, 王坚茹, 孟秀清. 水下航行体几何外形对阻力影响的数值模拟[J]. 机械, 2011, 38(9): 15-18.
- 12 方城林, 魏英杰, 王聪, 等. 不同头型高速射弹垂直入水数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(10): 77-82.
- 13 罗驭川, 黄振贵, 高建国, 陈志华, 侯宇, 郭则庆. 截锥体头型弹丸低速斜入水实验研究[J/OL]. 爆炸与冲击: 1-10.
- 14 顾建农, 高永琪, 张志宏, 等. 系列头型空泡特征及其对细长体阻力特性影响的试验研究[D]. , 2003.

## **Experimental study on the influence of aircraft with asymmetric head shape on the air bubble and ballistic characteristics**

HUA Yang, SHI Yao, PAN Guang, HUANG Qiao-gao

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

(Key Laboratory of Unmanned Underwater Vehicle Technology, Northwest Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi, 710072. Email: [shiyao@nwpu.edu.cn](mailto:shiyao@nwpu.edu.cn))

**Abstract:** The main research work of this paper is to study the influence of asymmetric isomeric head shape on the inflow cavitation and ballistic characteristics of the vehicle. By carrying out the impact tests of different head shapes, the formation and evolution mechanism of the inflow cavitation and the variation characteristics of the inflow trajectory are revealed in the range of Froude number 62-322. High-speed photography was used to study the trajectory and the evolution process of the water-entry cavitation of three types of aircraft with different tangential angles of 35°, 40° and 45° under the same tangential distance at different impact velocities of 5-12 m/s and at different impact angles of 60°, 70°, 80° and 90°. The results show that the trajectory of the vehicle with asymmetric isomeric head has a large deflection after entering the water. The deflection range is mainly related to the head shape of the vehicle, the angle of entering the water and the velocity of entering the water. Under the same water entry angle and velocity, the trajectory deflection of the vehicle with smaller head tangent angle is more significant; under different experimental conditions, the attitude angle of the vehicle follows the parabolic law of change with time; the asymmetric heterogeneous head with different tangent angles has different cavitation ability in the water entry zone, the smaller the tangent angle, the stronger the cavitation ability; at the same water entry angle and water entry velocity, the head has different cavitation ability in the water entry zone; and at the same water entry angle and water entry velocity, the head has different cavitation ability. The smaller the tangential angle, the larger the diameter of the opening cavity formed when the vehicle obliquely enters the water; the different angle of the asymmetric isomeric head-shaped vehicle has different stability of the cavitation entering the water. The smaller the tangential angle, the worse the stability of the cavitation entering the water, and the easier the cavitation collapses.

**Key words:** Asymmetric head; water entry; cavitation; trajectory; experimental study