

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0509

带尾裙跨介质航行体高速斜入水实验研究*

刘喜燕¹, 袁绪龙¹, 罗凯¹, 祁晓斌^{1,2}, 鲁娜¹

(1. 西北工业大学航海学院, 陕西 西安 710072;
2. 西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099)

摘要: 为了研究带尾裙跨介质航行体高速斜入水过程中空泡的发展及运动特性, 搭建了高速入水实验平台, 并设计了带有内测单元的实验模型, 对带尾裙跨介质航行体开展了入水角为 20° 、入水速度为 $30\sim 130\text{ m/s}$ 的实验研究。采用高速摄像机记录入水空泡, 同时由内测单元测量航行体的运动参数和泡内压力, 获得了航行体高速斜入水过程中空泡的发展特性、入水运动特性以及泡内压力的变化规律。实验结果表明: 带尾裙跨介质航行体在入水过程中形成了滑行运动特性, 入水空泡发生弯曲变形现象, 随着入水速度的升高, 入水弹道向上偏转的趋势更加明显; 航行体入水轴向过载峰值作用时间较长, 法向过载峰值在入水1.5倍航行体长度后逐渐降至零值附近波动; 泡内压力随入水空泡的形成和发展呈现先降低后升高的趋势, 且最低压力随入水速度呈线性趋势, 形成时间基本一致。

关键词: 跨介质航行体; 入水空泡; 空泡压力; 冲击载荷; 滑行运动特征

中图分类号: O368; TJ630.1 国标学科代码: 13025 文献标志码: A

Experimental study on high-velocity oblique water entry of a trans-media vehicle with tail-skirt

LIU Xiyan¹, YUAN Xulong¹, LUO Kai¹, QI Xiaobin^{1,2}, LU Na¹

(1. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;
2. Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xianyang 712099, Shaanxi, China)

Abstract: To study the cavity development and motion characteristics of the trans-media vehicle with tail-skirt during the process of oblique water entry at high velocity, a high-speed water-entry experiment at platform was built, and an experimental model with inertial measurement unit system was designed. The experimental study was carried out on the trans-media vehicle model with tail-skirt when the water-entry angle was 20° and the water-entry velocity ranged from 30 m/s to 130 m/s . A high-velocity camera was used to record the cavity during water entry, and the inertial measurement unit was used to measure the motion parameters of the vehicle and the pressure inside the cavity. The cavity development characteristics, the motion characteristics and the changing law of the pressure inside the cavity during the high-velocity oblique water entry were obtained. The experimental results show that the planning motion characteristics was formed during the water-entry process of the trans-media vehicle with tail-skirt, and the bending deformation of the cavity occurred. With the increase of the water entry velocity, the upward deflection trend of the water-entry trajectory became more obvious. The peak axial load of the vehicle entering water lasted for a long interval, so load reduction should be considered in the process of crossing media. The peak normal load gradually dropped to about zero after entering the water 1.5 times the length of the vehicle. During the high-velocity water-entry process, the upper surface of the trans-media vehicle was always wrapped in the cavity. The pressure inside the cavity decreased first and then increased with the formation and development of the cavity. The minimum pressure

* 收稿日期: 2022-11-14; 修回日期: 2023-07-10

基金项目: 瞬态物理国家重点实验室基金(6142604190401)

第一作者: 刘喜燕(1992—), 女, 博士研究生, liuxiyan1992@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 袁绪龙(1977—), 男, 博士, 副教授, yuanxulong@nwpu.edu.cn

changed linearly with the water entry velocity, while the formation time was basically the same.

Keywords: trans-media vehicle; water-entry cavity; pressure inside cavity; impact load; planning motion characteristics

随着现代舰船防御技术的发展, 常规战术导弹的作战效能面临巨大挑战, 为了大幅度提高反舰武器系统的突防能力, 跨介质航行体的概念应运而生。跨介质航行体采用空中巡航与末段反复出入水相结合的水空一体化弹道, 有望成为一种新型高效末端突防武器。由于水的密度约为空气密度的 800 倍, 航行体高速入水过程涉及介质突变、巨大冲击载荷及空泡非定常演变, 控制航行体高速入水弹道稳定是将高速跨水空武器工程实践化进程中首要解决的技术难题。对于超空泡航行体, 航行体尾段沾湿控制力对超空泡航行体的力系平衡和运动稳定至关重要^[1]。与常规超空泡航行体尾部结构相比, 扩张型尾裙结构有助于保持航行体运动稳定(“梭鱼”鱼雷), 即当攻角增大时, 航行体将产生可观的恢复力矩^[2]。开展带尾裙跨介质航行体高速入水实验研究, 对于提高航行体高速入水弹道稳定性具有重要的工程应用价值。

目前, 以空投鱼雷、空中射弹和反潜深弹等武器为工程背景开展的高速入水问题取得了大量的研究成果。为了探究航行体高速入水超空泡演变及航行体冲击载荷特性, 学者们开展了系列头型航行体高速入水研究。马庆鹏等^[3]和王恒等^[4]通过实验研究了球体垂直入水过程, 分析了入水空泡发展过程、空泡闭合现象以及阻力系数变化规律。黄振贵等^[5]研究了 90°锥形头型航行体垂直入水过程, 分析了不同入水冲击速度对入水空泡发展和演变过程的影响。邱海强等^[6]利用数值模拟研究了回转体以 50~150 m/s 速度垂直入水过程, 分析了入水速度和头型对入水冲击载荷及空泡形态的影响。张伟等^[7]和郭子涛等^[8]研究了入水速度在 35~160 m/s 范围内的射弹水平入水过程, 分析了平头、卵形和截锥形 3 种头型的射弹对入水空泡和弹道稳定性的影响。施红辉等^[9]研究了钝体倾斜和垂直冲击入水时引起的超空泡流动特性, 分析了头型对入水弹道和空泡发展特性的影响。为了研究倾斜入水对航行体高速入水空泡演化及弹道特性的影响, 罗驭川等^[10]研究了弹丸低速垂直和斜射入水的空泡形态演化过程, 分析了空泡闭合时间、闭合点水深和弹头空泡长度随入水速度的变化规律以及不同水深位置空泡直径的变化规律。侯宇等^[11]利用高速摄像技术开展了超空泡射弹 8°入水角高速斜入水试验, 分析了入水过程中弹体姿态对弹道稳定性和喷溅演化特性的影响。陈晨^[12]基于高速摄像实验方法, 开展了小型运动体亚音速倾斜入水过程研究, 分析了入水空泡及自由液面喷溅的演化过程、尾拍运动对空泡形态和尾迹及运动姿态的影响。陈诚等^[13]开展了带预置舵角的超空泡航行体入水试验, 研究了不同预置舵角对航行体弹道的影响。为了探究尾部外形对航行体高速入水空泡演化及弹道特性的影响, 刘如石等^[14]研究了不同尾部外形对航行体入水的影响。综上所述, 当前的研究主要集中于获得头型、入水速度及入水角等因素对航行体高速入水空泡演变、航行体冲击载荷及运动的影响。

关于扩张裙对跨介质超空泡航行体的影响, 当前的研究主要集中于获得扩张裙结构参数对航行体水动力特性的影响, 缺少带尾裙结构航行体高速入水空泡演变及航行体运动特性的研究^[15-16]。为了探究在系列入水速度下尾裙结构对超空泡演化、航行体受力载荷及弹道特性的影响, 本文中, 通过搭建高速入水实验平台, 在模型内部安装测量单元记录模型运动、冲击过载以及表面压力等参数, 利用高速摄像机记录入水过程空泡形态, 开展跨介质航行体在入水角为 20°、入水速度为 30~130 m/s 条件下的斜入水实验, 研究尾裙外形作用下的入水空泡演变特性, 分析入水速度对载荷特性及弹道特性的影响规律, 以为跨介质航行体总体方案设计提供参考。

1 实验

1.1 实验装置

跨介质航行体入水实验系统如图 1 所示, 由实验水池、发射装置、高速摄像系统以及拦截系统等组成。实验水池长 30 m, 宽 4 m, 深 4 m。发射装置为可变角度空气炮, 发射管内径为 100 mm, 管内安装截面尺寸为 8 mm×8 mm 的直线导轨, 发射架可实现 0°~40°入水角范围内变角度发射弹丸(航行体)。高速

摄像系统由水面俯视高速摄像机 CAM1、水下侧视高速摄像机 CAM2、水下射灯阵和背景板组成, 其中, 高速摄像系统采用的相机为 PHOTRON MiniUX10, 分辨率为 $1\ 280 \times 1\ 024$, 最高帧频可达 $4\ 000\ \text{s}^{-1}$, 内存为 8 GB, 可存储 4 s。弹丸最后进入多层钢板构成的缓冲拦截回收装置中, 拦截板由 2 层厚 3 mm 的钢板和 2 层厚 5 mm 的钢板组成, 间距 50 mm, 拦截板角度为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 。实验系统现场布置如图 2 所示。

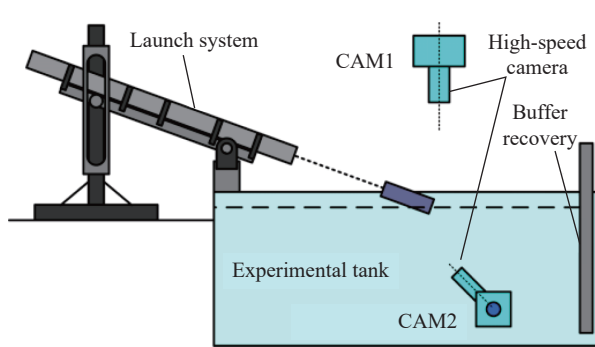


图 1 实验系统
Fig. 1 Experimental setup

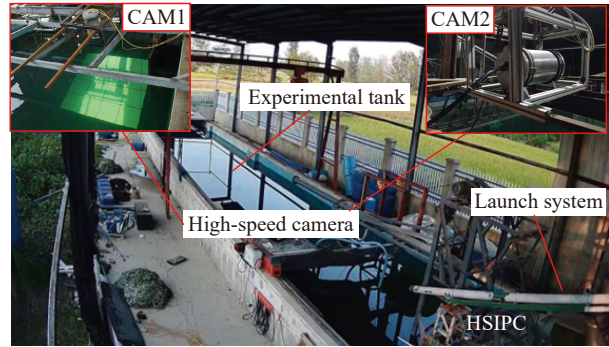
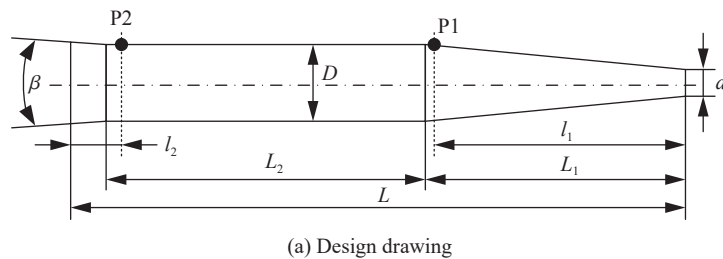


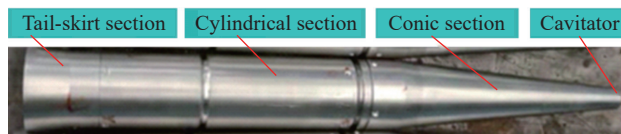
图 2 实验系统布置
Fig. 2 Layout of experimental setup

1.2 实验模型与坐标系

实验模型如图 3 所示, 由空化器、圆锥段、圆柱段和尾裙段组成。航行体模型长度 $L=640\ \text{mm}$, 圆锥段长度 $L_1=270\ \text{mm}$, 圆柱段长度 $L_2=330\ \text{mm}$, 圆柱段直径 $D=78.5\ \text{mm}$, 空化器直径 $d=26.6\ \text{mm}$, 尾裙段扩张锥角 $\beta=8^\circ$, 压力传感器 P1 布置于圆柱段上表面, 距离空化器端面 $l_1=265\ \text{mm}$, 压力传感器 P2 布置于尾裙段上表面, 距离尾端面 $l_2=50\ \text{mm}$, 模型质量 $m=5.4\ \text{kg}$ 。实验研究的入水角度为 20° , 入水速度 v_0 为 $30 \sim 130\ \text{m/s}$, 对应的佛劳德数 ($Fr = v_0 / \sqrt{gD}$) 为 $34.19 \sim 148.14$ 。



(a) Design drawing



(b) Photo

图 3 入水实验模型

Fig. 3 Water-entry experimental model

在实验模型内部安装测量单元, 包括运动参数测量系统和压力测量系统, 可实现入水过程的运动参数和压力信息的捕获。图 4 给出了测量单元安装结构, 设计了专用测试舱段, 段间采用螺纹+止口接口; 设置 O 形圈密封, 并将内测电路板固定在支架上, 以确保内测系统抗冲击、防水和防松。通过后端隔板引出充电接口、电源开关接口和数据下载接口。

由于高速入水实验中会受到极大的冲击载荷, 加速度计是易损件, 考虑到互换性, 加速度计采用外置方式, 单面电路板设计, 通过延长线与主板连接, 螺钉刚性连接在内测支架上。轴向加速度计量程为 $\pm 500g$, 法向和侧向加速度计量程为 $\pm 200g$ 。三角角速度传感器使用的是小型贴片式陀螺仪, 内置于主板电路板上, 三轴方向上的量程为 $\pm 4\ 000\ \text{}/\text{s}$ 。压力测量系统的量程为 250 kPa, 相对压力过载为 200%。

实验中, 采样率设置为 5 kHz, 可连续记录存储数据的时间为 2 s。

图 5 给出了坐标系的定义, 建立地面坐标系 $O_0x_0y_0z_0$ 和体轴坐标系 $Oxyz$, 坐标系原点 $O(O_0)$ 位于模型内测系统中加速度计所在位置, 距离前端面距离 $l=360$ mm, 图中 θ 为体轴坐标系的 Ox 轴与地面坐标系的 $x_0O_0z_0$ 平面之间的夹角, 表示航行体运动过程中的俯仰角。

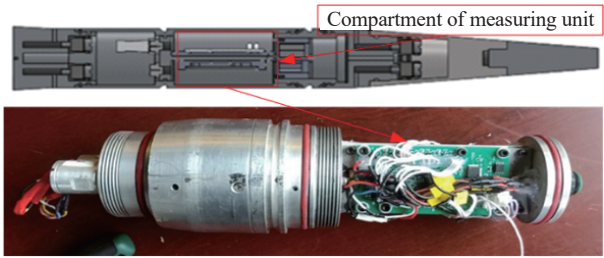


图 4 测量单元安装

Fig. 4 Installation of measuring unit

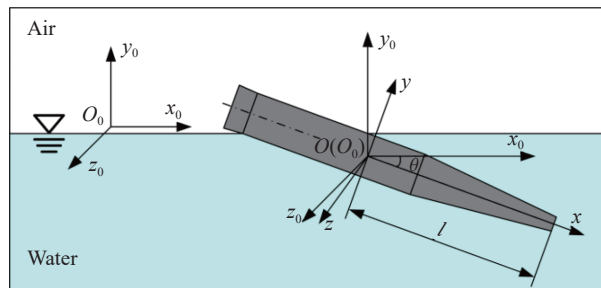


图 5 坐标系定义

Fig. 5 Definition of the coordinate system

1.3 实验误差和可重复性

为了避免实验和测试的偶然性, 获得真实可靠的实验结果, 对各工况均进行 3 次重复实验, 分别对高速摄像结果和内测结果进行重复性验证。经验证, 实验和测试结果具有较高的准确性和可重复性。

图 6 给出了航行体以 30 m/s 速度入水, 航行 2 倍弹长位置处的高速摄像视频截图。从图 6 可以看出, 空泡轮廓清晰, 利用袁绪龙等^[17]研制的空泡图像测量和分析处理系统, 获得空泡包裹下的航行体长度 L' 和圆柱段直径 D' 。长度测量结果 $L'=646$ mm, 与真实值的相对误差为 0.93%, 直径测量结果 $D'=86$ mm, 与真实值的相对误差为 0.96%。

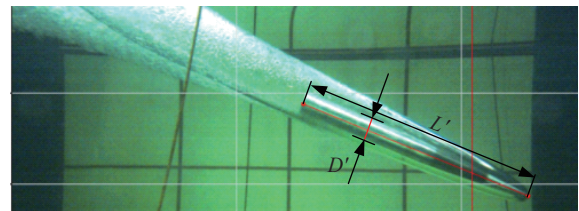


图 6 高速摄像处理结果

Fig. 6 High-speed camera processing result

在本次跨介质航行体高速入水实验中, 航行体加速的动力来自发射系统的高压气室, 航行体的入水速度取决于高压气室的压力。实验前先通过理论计算和预实验来确定实现对应入水速度所需的压力值。为了确保 3 次实验中高压气室压力保持一致, 在高压气室布置高精度压力表, 先将高压气室压力粗调至预期压力, 由于在充气过程中, 气体膨胀升温, 当气体恢复至常温时, 压力降低。观察压力表数值, 对气室压力值进行细调, 重复以上过程, 直至压力表显示压力值满足预期值。图 7 给出了入水速度 $v_0=70$ m/s 时入水过程中 3 次重复实验中的速度曲线, 其中坐标原点为航行体触水时刻。本文中限制的速

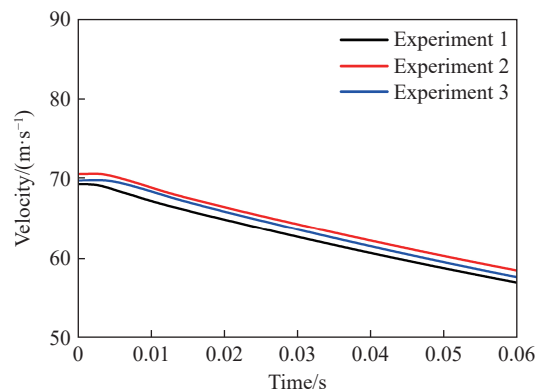


图 7 重复性实验的速度曲线对比

Fig. 7 Comparison of velocity curves among three repeatability experiments

度相对偏差为 $\pm 1.5\%$, 3 次重复实验的入水速度分别为 69.21、70.49 和 69.71 m/s, 速度偏差满足要求。

图 8 给出了入水速度 $v_0=70$ m/s 入水过程中 3 次重复实验的内测单元测量结果, 坐标原点取航行体触水时刻。其中, 图 8(a) 为重复实验得到的轴向过载曲线, 特征点数值重复性误差最大值为 3.90%, 图 8(b) 为重复实验得到的尾部压力曲线, 特征点数值重复性误差最大值为 6.88%, 最大重复性误差可以表示为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}, \quad \delta = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (1)$$

式中: σ 为标准差; δ 为重复性误差; n 为实验测量次数, 本文中 $n=3$; x_i 为每次实验测试的结果; \bar{x} 为多次实验测量的平均值。

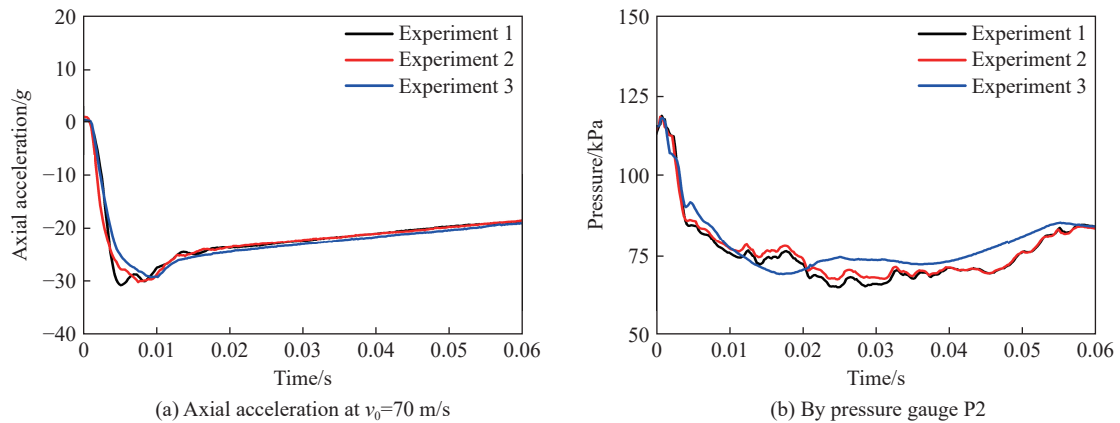


图 8 入水速度 70 m/s 时入水过程中测量单元重复性实验结果的对比

Fig. 8 Comparison of repeatability experiment results at the measuring unit during the water-entry process of the vehicle with the water-entry velocity of 70 m/s

2 实验结果与分析

2.1 入水空泡的发展过程和运动特性

图 9 给出了跨介质航行体以 70 m/s 斜入水过程中空泡形态的演化过程, 以航行体空化器接触水面为零时刻。从图 9 可以看出, 跨介质航行体经历了入水撞击、流动形成、开空泡运动、空泡闭合以及溃灭等阶段。撞水阶段: 摄像机虽未能捕获水面撞水过程, 但水下摄像机清晰地捕捉到了入水空泡的发展过程, 可以看到, 空泡壁面清晰透明, 呈非对称发展, 如图 9(a) 所示; 自由液面被挤压而发生内凹, 并向航行体外侧翻卷, 如图 9(b) 所示。流动形成阶段: 航行体在空泡内以滑行^[18]方式运动, 入水空泡出现弯曲变形现象, 可以看到尾部下表面接触空泡的痕迹, 如图 9(d)~(e) 所示; 入水一段距离后, 空泡弯曲效应减弱, 如图 9(f) 所示。开空泡阶段: 随着航行体的运动, 并伴随着大量空气涌入空泡内, 在航行体尾部区域形成了浑浊的水、气和汽掺混现象, 而在航行体锥段附近的空泡则光滑透明, 如图 9(g) 所示, 这是由于尾端面扩张尾裙外形使得迎流面和背流面产生压力差, 从而阻止了混合气体进入锥段空泡内。空泡闭合及溃灭阶段: 随着航行体的运动, 自由液面处空泡和水中空泡不断地扩张与收缩; 随着速度的衰减及深度的增加, 空泡颈部不断收缩直至发生闭合, 并伴随强烈的回射流, 如图 9(j) 所示。在空泡尾部闭合区域附近出现了空泡脱落漩涡, 这与文献 [19] 中出现的现象类似, 该漩涡主要是由水和气掺混形成的混合物, 在脱落尾部空泡后将逐渐消失。

为掌握跨介质航行体入水过程中的运动特性, 探究入水空泡弯曲特征的形成原因, 在此结合弹道内测数据进行分析。图 10 给出了入水过程中的轴向过载、法向过载、俯仰角以及速度随时间的变化规律,

其中轴向过载和法向过载是在体轴坐标系下定义的, 沿体轴 Ox 方向为其轴向过载, 沿纵轴 Oy 方向为其法向过载, 图中取航行体开始触水时刻为零时刻。从图 10 可以看出, 入水过程中航行体受到 2 次较剧烈的冲击过载。第 1 次冲击过载发生在空化器迎面撞水后 3.8 ms, 形成了轴向冲击过载峰值, 轴向过载峰值达到 30g, 而法向过载峰值形成时间要比轴向过载峰值时间提前 1.0 ms, 这是由于达到轴向过载峰值时, 空化器侵入水中一定的距离^[20], 空化器及部分圆锥段沾湿而产生的法向力作用使得航行体出现法向过载峰值; 第 2 次冲击过载发生在尾裙入水时刻, 定义入水距离 $s=v_0\Delta t$ (Δt 为第 2 次法向过载峰值时刻与入水时刻的时间间隔), 此时 $s=0.602$ m, 小于航行体长度 L , 为尾裙段滑行入水, 当前空泡并未完全包裹住航行体, 尾部下表面与空泡壁面接触, 处于沾湿状态, 其法向过载峰值约为第 1 次法向过载峰值的 2 倍, 且作用时间更长, 与图 9(e) 剧烈的气泡演变对应; 航行体以超空泡状态在水下航行时, 随着航行体滑行沾湿面积逐渐减小, 轴向过载逐渐减小, 法向过载回归到零值附近。入水过程中, 空化器产生的法向力使航行体产生了绕质心逆时针方向转动的趋势, 直至在航行体尾裙段滑行入水后出现运动转折点, 随后航行体在空泡内滑行运动, 滑行过程中产生的压力^[21]使得空泡发生弯曲变形。结合图 11 对航行体入水转向运动进行受力分析, 其中 M_z 为航行体受到的俯仰力矩, F_{xc} 、 F_{yc} 和 M_{zc} 分别为空化器所受的轴向力、法向力和俯仰力矩, F_{xw} 、 F_{yw} 和 M_{zw} 分别为航行体尾部所受的轴向力、法向力和俯仰力矩, 包含圆锥段、圆柱段以及尾裙段发生沾湿而产生的流体动力。可以看出, 航行体入水过程中, 空化器受到流体动力作用, 产生了绕头部逆时针方向的抬头力矩 M_{zc} , 在尾裙尚未入水时, 俯仰力矩 M_z (M_{zc} 占主导) 使得航行体在空泡内逆时针方向运动, 俯仰角逐渐减小, 在尾裙段滑行入水过程中, 由滑水升力作用而形成的恢复力矩 M_{zw} 使得航行体绕顺时针方向运动。

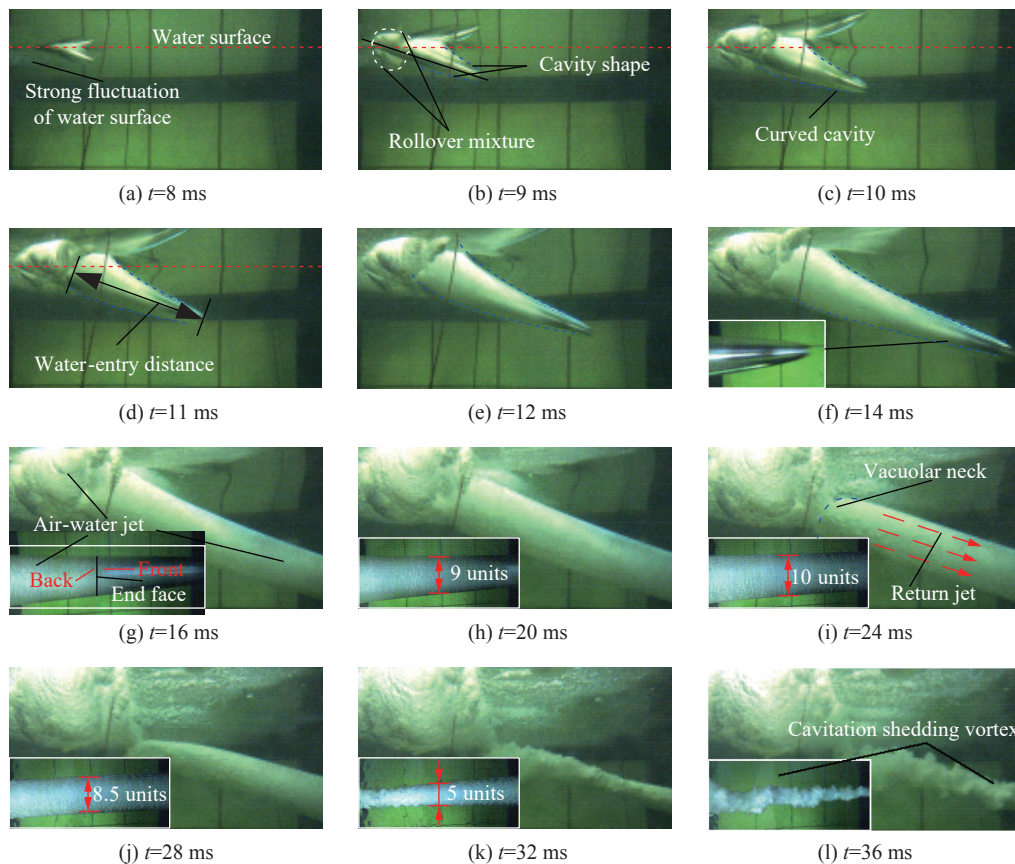


图 9 跨介质航行体入水的空泡发展过程

Fig. 9 Water-entry cavity development of the trans-media vehicle

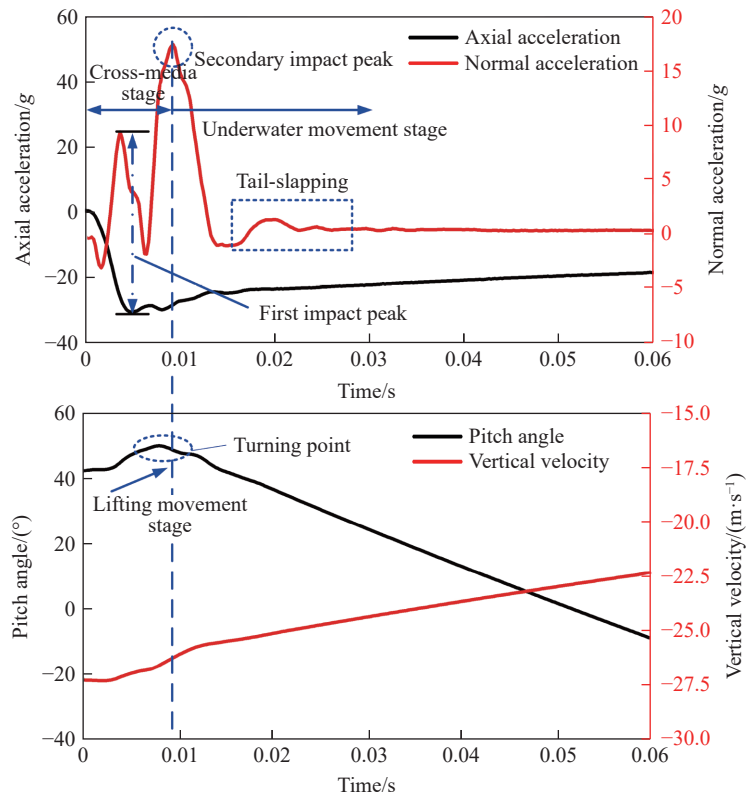


图 10 入水速度 70 m/s 入水过程的航行体过载特性和运动参数随时间的变化

Fig. 10 Overload characteristics and motion parameters of vehicle varying with time during the water-entry process of the vehicle with the water-entry velocity of 70 m/s

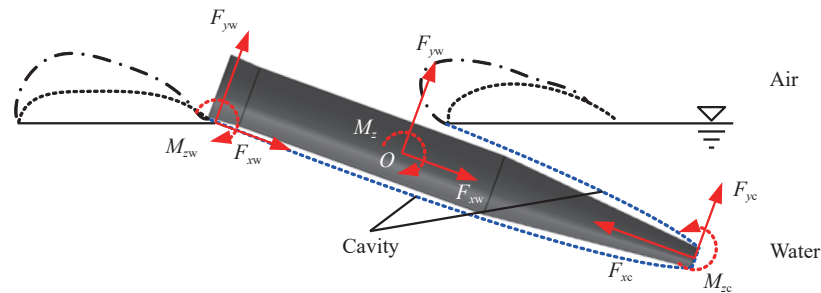


图 11 尾裙入水的受力分析

Fig. 11 Schematic diagram of forces on the tail-skirt at the time of water-entry

2.2 入水速度对斜入水过程的影响

2.2.1 入水速度对入水过程载荷特性的影响

图 12 给出了入水速度 v_0 为 30、50、70、90、110 和 130 m/s 时航行体入水过程中的载荷特性及俯仰角速度变化曲线的对比。从图 12 可以看出, 在 30~130 m/s 速度范围内, 随着入水速度升高, 入水轴向过载峰值显著增大, 载荷作用时间脉宽增加, 且稳定后的轴向过载也越大。结合表 1 可以看出, 航行体侵入水中一定距离后形成入水冲击过载峰值 $A_{x,max}$, 使得入水最大冲击过载峰值出现延迟, 且随着速度升高, 出现最大峰值的延迟时间 Δt 缩短, 这是由于航行体在入水过程中出现最大峰值时侵彻距离基本固定^[20]。当入水速度为 130 m/s 时, 入水轴向过载峰值达到 73.8g, 且高过载作用时间长。因此, 跨介质航行体设计中需要考虑高过载、长时间作用的影响。在入水过程中, 随着速度升高, 法向过载均值 $A_{y,avg}$ 随着

入水速度的升高而增大,但受到法向过载的作用时间缩短,稳定入水后,法向过载振荡减弱;入水过程中侧向过载平均值低于 g ,对入水纵平面弹道的影响较小。俯仰角速度表征航行体俯仰运动,与法向过载变化规律相对应,当俯仰角速度和法向载荷均呈现双向振荡时,将形成双侧尾拍运动弹道特征,当俯仰角速度和法向载荷均保持正向或负向振荡时,则形成滑水稳定运动弹道特征。在入水运动至 1.5 倍航行体长度过程中,对于 $v_0=30\text{ m/s}$ 工况,经历双向尾拍运动向滑水运动过渡历程。其他速度工况下均形成了滑水运动弹道特征。当入水速度升高时,航行体受到的抬头力矩增大,并加剧了对入水空泡壁面的挤压^[22],使得航行体尾部载荷增大;当尾裙浸入水中时,随着滑行升力的形成,航行体受力逐渐减小。

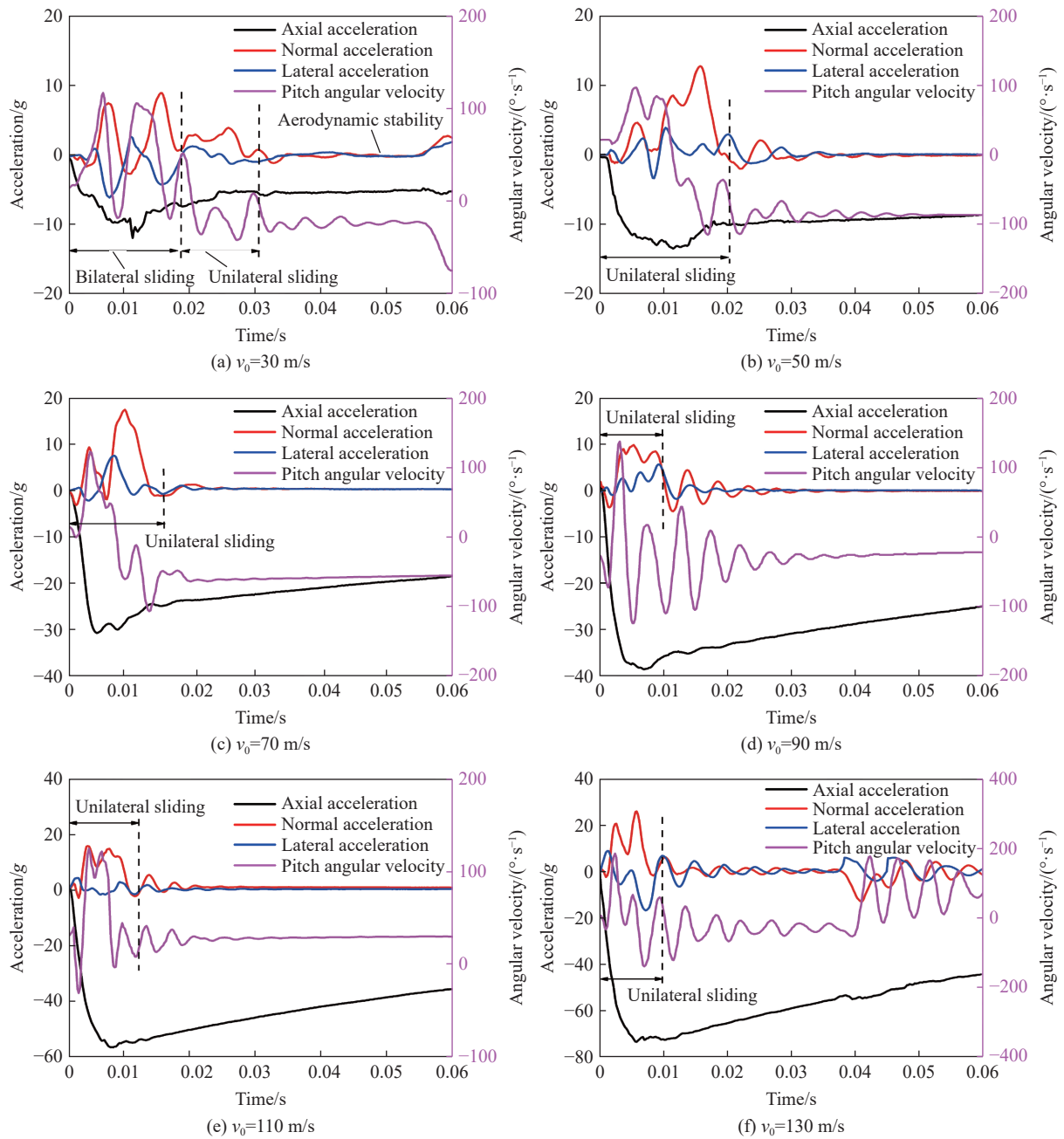


图 12 不同入水速度时的载荷特性曲线

Fig. 12 Load characteristics curves at different water-entry velocities

表 1 不同入水速度时轴向和法向过载特性

Table 1 Characteristics of axial and normal overloads at different water-entry velocities

$v_0/(m \cdot s^{-1})$	轴向过载		法向过载	
	$A_{x,max}/g$	$\Delta t/ms$	$A_{y,avg}/g$	s/L
30	12.0	13.0	3.5	1.491
50	13.3	11.0	6.5	1.492
70	30.4	9.8	8.2	1.496
90	38.6	8.2	8.3	1.495
110	56.8	7.4	12.5	1.497
130	73.8	5.9	17.8	1.505

注: 根据文献[23]计算滑行周期内法向过载的均值。

2.2.2 入水速度对空泡压力的影响

为了分析入水过程中空泡内的压力特性, 图 13 给出了入水速度 $v_0=70$ m/s 工况下圆锥段处压力传感器 P1 和尾裙段处压力传感器 P2 的压力曲线。从图 13 可以看出, 航行体头部开始触水时, 测点处于空中阶段, 航行体表面压力值约为 101 kPa, 仅有小幅波动; 随着航行体高速运动侵入水下, 压力传感器 P1 测得的压力出现较小的冲击峰值, 其量值为 108 kPa, 此后经过 8.9 ms, 航行体尾部进入水中, 压力传感器 P2 测得的压力冲击峰值达到 119 kPa; 随着空泡的形成, 航行体表面压力开始下降, 且随着入水深度的增加而逐渐减小, 航行体前端和尾段的测点压力的最小值基本保持在约 63 kPa; 随着入水空泡发生闭合、收缩, 泡内压力逐渐上升。

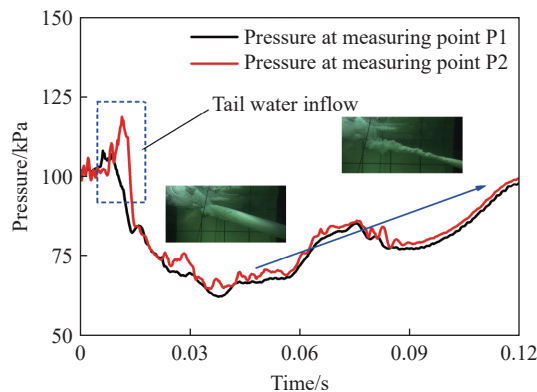


图 13 入水速度 70 m/s 入水过程中压力传感器 P1 和 P2 测得的压力曲线

Fig. 13 Pressure curves obtained by the pressure gauges P1 and P2 during the water-entry process of the vehicle with the water-entry velocity of 70 m/s

为了分析入水速度对航行体表面压力的影响, 图 14(a) 给出了入水速度 v_0 为 30、50、70、90、110 和 130 m/s 工况下压力传感器 P1 测得的入水过程中的压力变化曲线, 图 14(b) 给出了压力传感器 P1 测得的压力最小值(p_{min})及无量纲时间(T_{min})与入水速度的关系, 航行体触水时刻为坐标原点。从图 14 可以看出, 随着入水速度的提高, 入水空泡内部压力最小值逐渐降低, 空泡内最低压力随着速度的升高呈近似线性减小的变化趋势, 与文献 [24] 具有一致的变化规律。根据伯努利方程, 随着流速的升高, 其周围环境压力降低; 受空化器阻碍, 水流绕空化器外缘绕流, 导致空化器流经的区域流速增大, 其周围压力降低, 且压力随入水速度的升高而降低。因此, 当入水速度升高时, 空泡内压力最小值逐渐降低。此后泡内压力皆上升, 航行体撞到拦截板后, 深度不变, 压力波动着趋向平稳, 稳态值对应当前水深压力。

定义空泡出现最小压力的无量纲时间 T_{min} :

$$T_{\min} = \frac{v_0 t_{\min}}{D} \quad (2)$$

式中: t_{\min} 为以航行体触水为零时刻时获得的泡内最小压力时间。

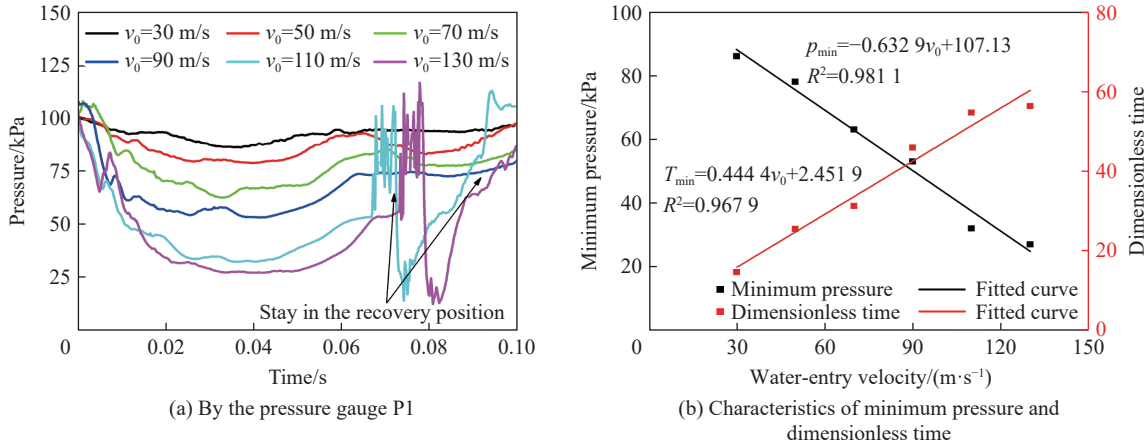


图 14 不同入水速度下压力传感器 P1 的压力特性

Fig. 14 Pressure characteristics obtained by pressure gauge P1 at different water-entry velocities

从图 14(b) 可以看出, 泡内压力最小值的无量纲时间 T_{\min} 与入水速度 v_0 基本呈线性关系, 拟合方程如图中所示, 斜率为一定值。可知航行体入水过程中泡内最小压力形成时间几乎为定值。结合对空泡表面闭合特性的研究经验^[25], 认为泡内最小压力形成时间主要受到航行体外形的影响。

2.2.3 入水速度对入水弹道特性的影响

图 15 给出了不同入水速度下航行体的弹道参数, 其中, 横坐标原点取为航行体入水时刻, 图 15(a) 为无量纲运动速度 v/v_0 随时间的变化曲线, 图 15(b) 为不同入水速度下航行体质心的运动轨迹。从图 15 可以看出, 入水过程中, 随着入水速度升高, 速度衰减加快, 在入水 100 ms 后, 入水速度 $v_0=130$ m/s 工况下, 运动速度下降 40%, 而入水速度 $v_0=30$ m/s 工况下, 运动速度仅下降 10%; 随着入水速度升高, 航行体质心运动轨迹向上偏转趋势显著增加, 且入水速度 v_0 为 50、70、90、110 和 130 m/s 工况的入水空泡在水面处较宽大, 空泡壁面较粗糙, 空泡弯曲特征更加明显, 如图 16 所示。结合图 15~16 可知, 随着入水速度的升高, 航行体入水过程中的滑阻力增大, 对空泡壁面的压力^[21] 增大, 因此对空泡壁面的挤压程度也越大。

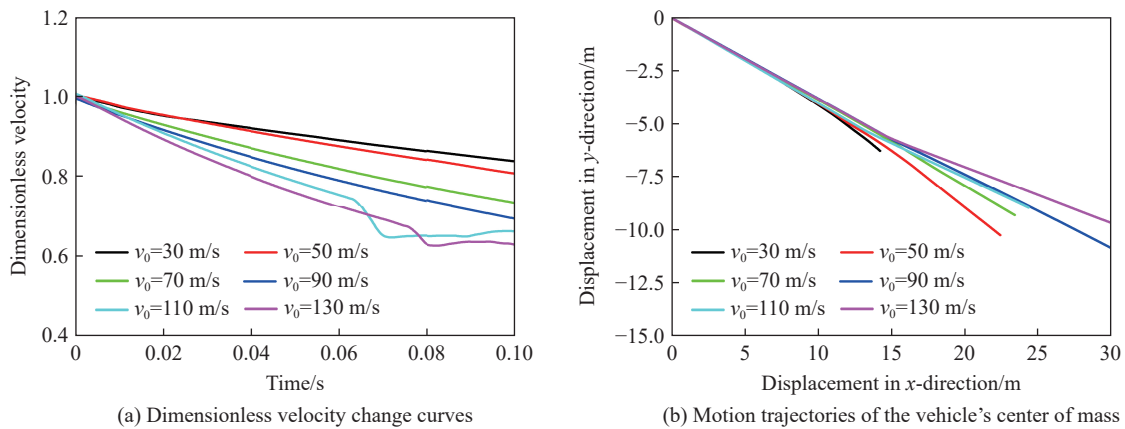


图 15 不同入水速度下的运动弹道参数

Fig. 15 Motion trajectory parameters under different water-entry velocities

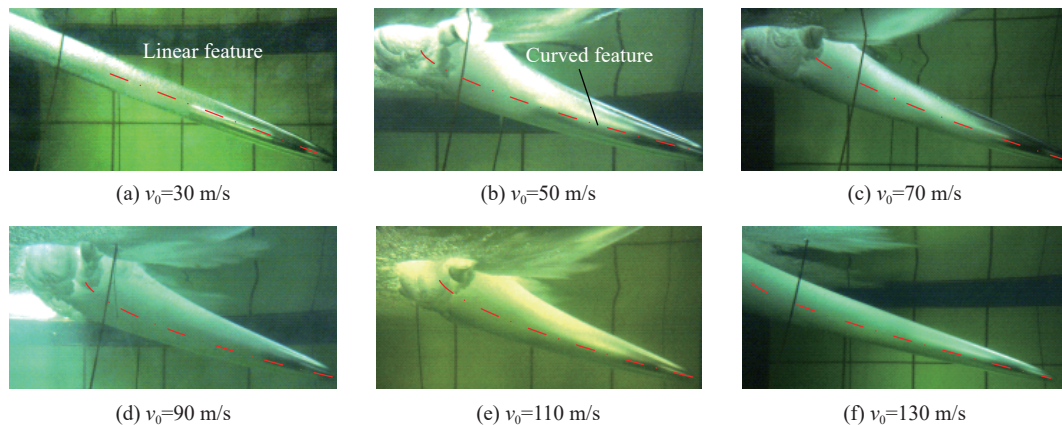


图 16 不同入水速度的空泡特征

Fig. 16 Cavity characteristics under different water-entry velocities

3 结 论

采用高速摄像与内置测量单元相结合的研究手段,对带尾裙跨介质航行体 20° 角倾斜入水过程开展了实验研究,探究了带尾裙航行体入水空泡发展特性及形成机理,分析了不同入水速度下航行体载荷特性、空泡压力特性以及弹道特性的变化规律,得到以下主要结论。

(1) 带尾裙跨介质航行体 20° 倾斜角入水时,随着入水速度升高,航行体入水初期即形成了滑行运动弹道特征,入水空泡出现弯曲现象;航行体滑行过程中产生的压力使得空泡发生弯曲变形,且随着入水速度升高,空泡弯曲效应加剧,入水弹道向上偏转趋势增加。

(2) 随着入水速度的提高,入水轴向和法向冲击过载峰值均增大,轴向过载出现最大峰值时的延迟时间缩短;在入水 1.5 倍航行体长度后,法向冲击过载降至最小;跨介质航行体入水过程中经历高过载作用的时间较长,因此跨介质入水过程需要考虑降载。

(3) 高速入水过程中,跨介质航行体上表面始终处于空泡内,泡内压力随着开空泡阶段向空泡闭合转变呈现先降低后升高的变化趋势;泡内最低压力随着入水速度升高而线性降低,但泡内压力降到最低的时间基本一致。

参考文献:

- [1] LI D J, LI F J, SHI Y Z, et al. A novel hydrodynamic layout of front vertical rudders for maneuvering underwater supercavitating vehicles [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 215: 107894. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107894.
- [2] 栗夫园, 党建军, 张宇文. 带锥形空化器超空泡航行体的空泡与力学特性 [J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(2): 161-167. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2017.02.007.
- LI F Y, DANG J J, ZHANG Y W. Cavity and hydrodynamic features of supercavitating vehicle with conical cavitator [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2017, 38(2): 161-167. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2017.02.007.
- [3] 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): 174-180. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)02-0174-07.
- MA Q P, HE C T, WANG C, et al. Experimental investigation on vertical water-entry cavity of sphere [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(2): 174-180. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)02-0174-07.
- [4] 王恒, 孙铁志, 路中磊, 等. 球体入水空泡演变和运动特性影响试验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(12): 123901. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0415.
- WANG H, SUN T Z, LU Z L, et al. Experimental study on the cavity evolution and motion characteristics of spheres into water [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(12): 123901. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0415.
- [5] 黄振贵, 王瑞琦, 陈志华, 等. 90° 锥头弹丸不同速度下垂直入水冲击引起的空泡特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(6): 1189-1199. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0115.

- HUANG Z G, WANG R Q, CHEN Z H, et al. Experimental study of cavity characteristic induced by vertical water entry impact of a projectile with a 90° cone-shaped head at different velocities [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(6): 1189–1199. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0115.
- [6] 邱海强, 袁绪龙, 王亚东, 等. 回转体高速垂直入水冲击载荷和空泡形态仿真 [J]. *鱼雷技术*, 2013, 21(3): 161–164. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1948.2013.03.001.
- QIU H Q, YUAN X L, WANG Y D, et al. Simulation on impact load and cavity shape in high speed vertical water entry for an axisymmetric body [J]. *Torpedo Technology*, 2013, 21(3): 161–164. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1948.2013.03.001.
- [7] 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. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)06-0579-06.
- ZHANG W, GUO Z T, XIAO X K, et al. Experimental investigation on behaviors of projectile high-speed water entry [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(6): 579–584. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)06-0579-06.
- [8] 郭子涛, 张伟, 郭钊, 等. 截卵形弹水平入水的速度衰减及空泡扩展特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(4): 727–733. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0727-07.
- GUO Z T, ZHANG W, GUO Z, et al. Characteristics of velocity attenuation and cavity expansion induced by horizontal water-entry of truncated-ogive nosed projectile [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(4): 727–733. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0727-07.
- [9] 施红辉, 胡青青, 陈波, 等. 钝体倾斜和垂直冲击入水时引起的超空泡流动特性实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(5): 617–627. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0617-08.
- SHI H H, HU Q Q, CHEN B, et al. Experimental study of supercavitating flows induced by oblique and vertical water entry of blunt bodies [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(5): 617–627. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0617-08.
- [10] 罗驭川, 黄振贵, 高建国, 等. 截锥体头型弹丸低速倾斜入水实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(11): 113902. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0498.
- LUO Y C, HUANG Z G, GAO J G, et al. Experiment research of low-speed oblique water-entry of truncated cone-shaped projectile [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(11): 113902. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0498.
- [11] 侯宇, 黄振贵, 郭则庆, 等. 超空泡射弹小入水角高速斜入水试验研究 [J]. *兵工学报*, 2020, 41(2): 332–341. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.02.015.
- HOU Y, HUANG Z G, GUO Z Q, et al. Experimental investigation on shallow-angle oblique water-entry of a high-speed supercavitating projectile [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(2): 332–341. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.02.015.
- [12] 陈晨. 小型运动体亚/跨声速入水多相流动特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 36–47.
- CHEN C. Multiphase flow characteristics of subsonic and transonic water-entry for small moving body [D]. Harbin, Heilongjiang, China: Harbin Institute of Technology, 2019: 36–47.
- [13] 陈诚, 袁绪龙, 邢晓琳, 等. 预置舵角下超空泡航行体倾斜入水弹道特性研究 [J]. *兵工学报*, 2018, 39(9): 1780–1785. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.09.015.
- CHEN C, YUAN X L, XING X L, et al. Research on the trajectory characteristics of supercavitating vehicle obliquely entering into water at preset rudder angle [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(9): 1780–1785. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.09.015.
- [14] 刘如石, 郭则庆, 张辉. 尾部形状对超空泡射弹尾拍运动影响的数值研究 [J]. *兵工学报*, 2023, 44(10): 2984–2994. DOI: 10.12382/bgxb.2022.0689.
- LIU R S, GUO Z Q, ZHANG H. Numerical simulation on the influence of tail shapes on the tail-slap of supercavitating projectiles [J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(10): 2984–2994. DOI: 10.12382/bgxb.2022.0689.
- [15] 张衡. 尾型对超空泡航行器水动力特性的影响研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- ZHANG H. Stern hydrodynamic characteristics of supercavitation vehicle research [D]. Xi'an, Shaanxi, China: Northwestern Polytechnique University, 2015.
- [16] 王科燕, 邓飞, 张衡, 等. 超空泡航行器扩张尾裙流体动力特性试验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(1): 53–58. DOI: 10.7652/xjtub201601009.
- WANG K Y, DENG F, ZHANG H, et al. Experimental research on hydrodynamic characteristics of supercavitating vehicle expansion sterns [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(1): 53–58. DOI: 10.7652/xjtub201601009.

- [17] 袁绪龙, 张宇文, 刘乐华. 空泡外形测量与分析方法研究 [J]. *实验力学*, 2006, 21(2): 215–219. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4888.2006.02.016.
YUAN X L, ZHANG Y W, LIU L H. On methods of cavity profile measurement and analysis [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2006, 21(2): 215–219. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4888.2006.02.016.
- [18] 刘喜燕, 袁绪龙, 罗凯, 等. 预置舵角对跨介质航行体入水尾拍运动影响试验 [J]. *兵工学报*, 2023, 44(6): 1632–1642. DOI: 10.12382/bgxb.2022.1117.
LIU X Y, YUAN X L, LUO K, et al. Experiment on the influence of preset rudder angle on the tail-slapping motion of a trans-media vehicle during water entry [J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(6): 1632–1642. DOI: 10.12382/bgxb.2022.1117.
- [19] 赵成功, 王聪, 魏英杰, 等. 细长体水下运动空化流场及弹道特性实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(3): 439–446. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)03-0439-08.
ZHAO C G, WANG C, WEI Y J, et al. Experiment of cavitation and ballistic characteristics of slender body under movement [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(3): 439–446. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)03-0439-08.
- [20] 陈诚, 袁绪龙, 党建军, 等. 超空泡飞行器 20°角倾斜入水冲击载荷特性试验研究 [J]. *兵工学报*, 2018, 39(6): 1159–1164. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.06.016.
CHEN C, YUAN X L, DANG J J, et al. Experimental investigation into impact load during oblique water-entry of a supercavitating vehicle at 20° [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(6): 1159–1164. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.06.016.
- [21] 刘富强, 罗凯, 梁红阁, 等. 回转体潜水航行流体动力特性研究 [J]. *西北工业大学学报*, 2021, 39(1): 101–110. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2758.2021.01.013.
LIU F Q, LUO K, LIANG H G, et al. Research on hydrodynamic characteristics of cylinder planning [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2021, 39(1): 101–110. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2758.2021.01.013.
- [22] 刘喜燕, 罗凯, 袁绪龙, 等. 扩张尾裙对跨介质飞行器高速入水转平弹道特性影响 [J]. *力学学报*, 2023, 55(2): 343–354. DOI: 10.6052/0459-1879-22-427.
LIU X Y, LUO K, YUAN X L, et al. Influence of expansion sterns of the flattening trajectory characteristics of a trans-media vehicle during high speed water entry [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(2): 343–354. DOI: 10.6052/0459-1879-22-427.
- [23] 陈诚. 超空泡飞行器尾拍作用机理与动力学建模 [D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
CHEN C. Investigation of the mechanism of tail slapping and dynamic modeling of supercavitating vehicles [D]. Xi'an, Shaanxi, China: Northwestern Polytechnical University, 2019.
- [24] 时素果, 杨晓光, 王亚东, 等. 细长体高速入水过程压力特性试验研究 [J]. *应用力学学报*, 2018, 35(2): 223–227, 445. DOI: 10.11776/cjam.35.02.A009.
SHI S G, YANG X G, WANG Y D, et al. Experimental study on the pressure characteristic of high-speed slender body water entry [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2018, 35(2): 223–227, 445. DOI: 10.11776/cjam.35.02.A009.
- [25] 赵成功. 高速射弹非常运动多相流场与弹道特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 95–99.
ZHAO C G. Research on multiphase flow and trajectory characteristics of unsteady movement of high speed projectile [D]. Harbin, Heilongjiang, China, Harbin Institute of Technology, 2017: 95–99.

(责任编辑 蔡国艳)