

超空泡射弹小入水角高速斜入水试验研究

侯宇, 黄振贵, 郭则庆, 陈志华, 刘如石, 罗驭川

(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏南京 210094)

摘要: 为研究超空泡射弹小入水角高速斜入水性能, 利用高速摄像技术开展了超空泡射弹入水试验。沿水下弹道轨迹的左侧等距布置压力传感器测试压力变化, 分析弹体不同侧滑角入水冲击过程的弹道轨迹、喷溅演变和水下压力波传播特征。结果表明: 对于射弹小入水角高速斜入水, 弹体小侧滑角入水能形成较光滑透明的入水空泡和稳定的入水弹道, 较大的侧滑角易造成空泡内严重雾化、弹道轨迹偏转和弹体损坏等现象, 严重程度随侧滑角增大而增大; 小侧滑角下弹头空化器及圆锥段斜面与水面的撞击使得入水喷溅在俯视下呈左右近似对称的“蝶”状, 侧滑角对前半部分喷溅的左右对称性影响较小, 对后半部分喷溅的对称性和范围影响较大, 前半部分喷溅的对称轴随着侧滑角增大会出现相应偏转; 入水冲击产生的水下压力波变化过程可分成两阶段: 由弹体和水域冲击产生的初始压力波动阶段和各压力波叠加的高频脉动阶段, 两阶段压力波动因侧滑角增加后入水状态的不同而呈现不同的变化特征。

关键词: 超空泡射弹; 小入水角; 入水试验; 侧滑角; 喷溅; 水下压力波

中图分类号: TJ630.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2020)02-0332-10

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.02.015

Experimental Investigation on Shallow-angle Oblique Water-entry of a High-speed Supercavitating Projectile

HOU Yu, HUANG Zhengui, GUO Zeqing, CHEN Zhihua, LIU Rushi, LUO Yuchuan

(National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: The shallow-angle oblique water-entry of a high-speed supercavitating projectile is studied by using the high-speed photography technology. The characteristics of the ballistic trajectory, splash formation and underwater pressure wave propagation during the initial water-entry impact at different sideslip angles are observed and analyzed from the underwater pressure signal monitored along the left side of the trajectory. The results show that the small sideslip angle of the projectile has few effect on the smooth cavity formation and the enter trajectory stability during the high-speed oblique water-entry at small entry angle. The larger sideslip angle is able to lead to the severe water atomization in the cavity, the ballistic deflection and the projectile damage. The increase in the sideslip angle can exacerbate this instability. The impacts of the cavitator and the warhead conical section on the free surface at a small entry angle make the splash be an approximate symmetrical “butterfly shape” in birds-eye view. The sideslip angle has inverse influence on the symmetry of the front half of splash comparing with the rear half of splash. Large changes are presented in the splash range with the increase in sideslip angle. The symmetry axis of

收稿日期: 2019-03-18

基金项目: 装备发展部装备预先研究基金项目(61426040303162604004, 614260403041803); 中央高校基本科研业务费专项项目(309190112A2, 30917012101); 江苏省研究生科研与创新计划项目(KYCX19_0259)

作者简介: 侯宇(1993—), 男, 博士研究生。E-mail: houyu@njust.edu.cn

通信作者: 黄振贵(1986—), 男, 副研究员, 硕士生导师。E-mail: hzgkeylab@njust.edu.cn

the front half of splash is deflected with the increase in sideslip angle. The changing process of underwater pressure wave induced by the water-entry impact is divided into two stages: the initial pressure fluctuation stage induced by the initial impact of the projectile on the water and the fluctuation stage of high frequency induced by the superposition of the pressure waves from various directions. The two pressure fluctuation stages show different variation characteristics with the corresponding water entry state due to the increased sideslip angle.

Keywords: supercavitating projectile; shallow entry angle; water-entry experiment; sideslip angle; splash; underwater pressure wave

0 引言

入水过程是入射体从空气中穿过气体与液体交界面进入水中的过程,高速入水过程会瞬间出现巨大的冲击载荷,伴有强烈的水下压力波的产生,同时形成包裹弹体的超空泡,这对空投鱼雷、超空泡射弹等水下航行体结构强度、隐身性能和弹道稳定性提出了严峻的挑战。

对于航行体入水问题的研究已有一个世纪,最早始于对刚性球体垂直入水的试验,研究入水空泡演化过程^[1]、球体运动阻力特性^[2-3]等,首次提出了喷溅、空泡闭合方式等概念。随着入水问题研究的进一步深入,国内外学者取得了一定的成果。对于刚性球体,Truscott等^[4]采用对称转轮的夹持装置对球体自旋入水进行了试验,研究自旋速度对球体入水空泡演化和运动特性的影响。对于回转体射弹模型,研究更多地关注头型对射弹入水过程的影响,陈先富^[5]分别对锥头圆柱体和圆钢珠水平高速(720~1370 m/s)入水进行了试验研究,研究2种弹丸对入水空穴演化的影响;张伟等^[6]进行了3种头型弹丸水平高速(<160 m/s)入水试验,研究不同头型对入水弹道的影响;杨衡等^[7]和路丽睿等^[8]分别对不同头型射弹60°和55°倾斜低速(<6 m/s)入水进行了试验研究,分析了头型和入水速度对入水空泡和弹道特性的影响;王云等^[9]对斜截头弹体30°倾斜入水(62~140 m/s)进行了试验,研究头型引起的弹体跨介质入水弹道弯曲的现象;施红辉等^[10]进行了不同头型钝体18°倾斜和垂直入水试验(<100 m/s),分析了不同工况下空泡形成和弹体运动轨迹变化;蒋运华等^[11-12]对圆盘空化器航行体开展了垂直和斜入水试验研究,分析了弗劳德数、入水角度(45°~90°)和通气率对空泡尺寸、喷溅闭合时间和位置的影响;周杰等^[13]对锥柱弹丸300~400 m/s和1800 m/s倾斜入水进行了试验研究,分析了2种速度下气水界面的冲击波系和流场

结构变化;陈诚等^[14-15]利用内置惯性测量单元对超空泡航行器20°角倾斜入水(44~90 m/s)进行了试验,并结合数值模拟研究空化器直径对入水过程中冲击载荷变化特性的影响;Chen^[16]分别对3种头型射弹90°和80°入水(44~150 m/s)进行试验研究,分析了3种头型对弹道稳定性和水下压力波峰值的影响。

综上所述,目前针对射弹入水的试验入水角度范围为15°~90°,关注点着重在入水时物体所受冲击载荷和入水空泡演化,对于高速下更小入水角的入水试验研究较少。Truscott等^[17]对子弹以5°~15°入水角,380 m/s速度斜入水进行了试验研究,观察了在浅水区超空泡的形成和发展,但其未研究入水时弹体姿态对喷溅演变、弹丸结构和入水后物体运动轨迹的影响,此外,入水冲击所诱导产生的水下压力波远距离传播变化规律也未见报道。

考虑到水下攻防武器多倾斜发射于存在随机波浪的水面,实际应用中存在更小的射弹入水角度。因此,本文采用高速摄像技术等构建的水靶道试验技术对超空泡射弹8°入水角高速斜入水过程开展试验研究,研究其入水瞬间弹体姿态对弹道稳定性和喷溅演化特性的影响。同时在试验水域均匀布置压力传感器,监测流场压力变化,研究入水过程中水下压力波的传播变化规律,为今后入水航行体的弹道控制和入水冲击压力波的监测分析提供数据参考和试验指导。

1 试验方案和试验模型

1.1 试验系统

斜入水试验系统示意图如图1所示,试验在35 m×2.4 m×2.4 m水靶道中进行,水深约2.2 m,水池两侧和底部均由钢板焊接制成,弹道终点采用钢制材料防护。试验采用12.7 mm口径滑膛弹道枪为发射装置,枪口高度 H 约3.73 m,枪管轴线与水平面夹角 α 为8°。弹体出膛后至入水点的飞行距

离约为 10 m,空中飞行时间约 15 ms. 因空中飞行过程中受到的扰动量级远小于水中,为方便分析,可假设在空中阶段弹丸速度方向和大小变化很小, α 可看作是弹体入水速度 v_0 与水平面的夹角,即入水角. 速度矢量 v 位于水靶道铅垂对称面上, v_x 为 v 在 x 轴方向上的投影. 入水点侧方和正上方分别布置一台高速摄影记录入水瞬间空泡形成过程和弹道特征,其中侧方为灰度摄影,上方为彩色摄影,拍摄

频率分别为 2 800 帧/s 和 6 000 帧/s,相机均套有塑料防水袋,以避免水花溅射损坏相机. 池底拍摄视界内布有黑白相间的坐标尺,用于校准高速摄影位移和尺寸测量结果. 同时位于水下沿弹体飞行轨迹左侧 1、2、3、4 高度等距分别布置 1 对压电式测压传感器($A_1、A_2、A_3、A_4$ 和 $B_1、B_2、B_3、B_4$),用于测量入水冲击瞬间周围水域压力变化,系统实物照片如图 2 所示.

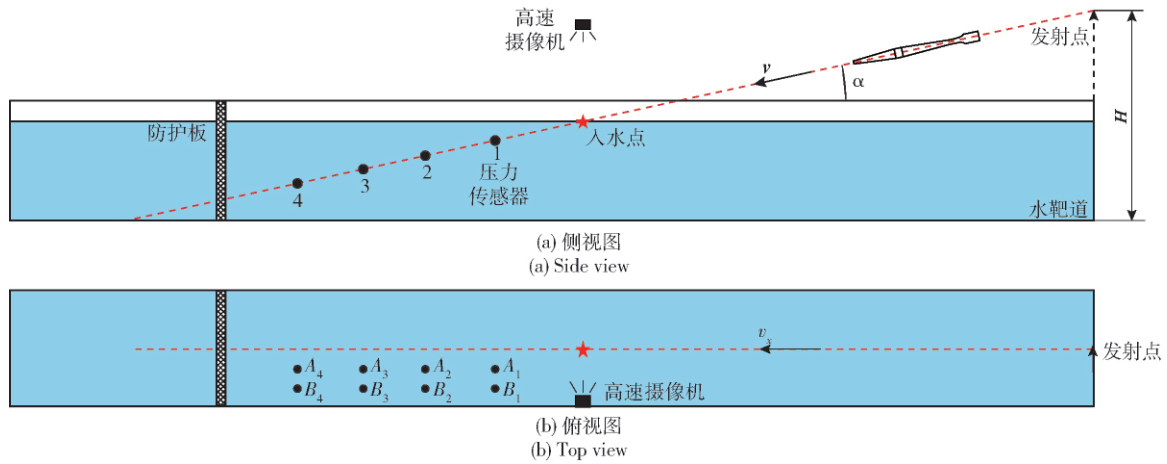


图 1 试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

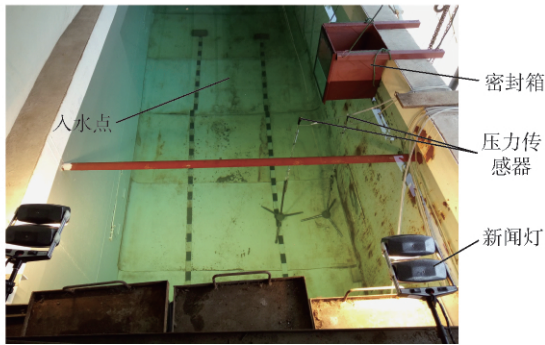


图 2 试验系统实物图(视向为弹道终点指向发射点)
Fig. 2 Photo of experimental system (the visual direction is from the ballistic end to the launch point)

1.2 试验模型

图 3 为超空泡射弹模型俯视图,由空化器、圆锥段、圆柱段和尾部组成. 弹长为 l ,圆柱段最大直径为 D ,空化器直径为 d ,重心距前端面距离约 $0.34l$. θ 为射弹的偏航角,即弹轴在水平面的投影与惯性坐标系 Ox 轴的夹角. 弹身采用铝合金材料,弹头部圆锥段采用钨合金,整个弹体通过螺纹连接而成,总质量 m 为 0.104 kg,采用火药发射.

为描述入水时弹体姿态的微小偏转分别建立惯性坐标系 $Oxyz$ 和弹体坐标系 $Ox'y'z'$,如图 4 所示:

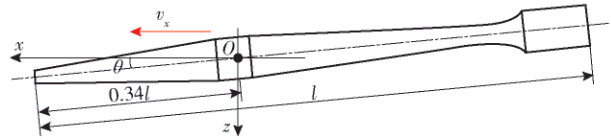


图 3 超空泡射弹试验模型(俯视图)

Fig. 3 Experimental model of supercavitating projectile (top view)

Ox 轴平行于水面指向弹道末端, Oy 轴垂直于水平面竖直向下, Oz 轴垂直于面 Oxy 指向射弹飞行左侧;入水速度矢量 v_0 处于 Oxy 平面上,面 $Ox'y'$ 为过

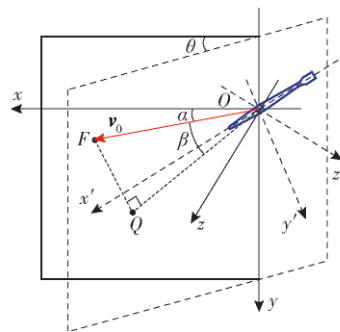


图 4 射弹入水时侧滑角示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sideslip angle of projectile at the water-entry time

弹轴的弹体纵向对称面; Q 为速度 v_0 终点 F 向面 $Ox'y'$ 作垂线形成的垂点, 则侧滑角 $\beta = \angle FOQ$, 即射弹入水速度矢量与弹体纵向对称面的夹角。根据入水点上方高速摄像图片可测量出 θ 角, 如图 3 所示, 并结合入水角 α , 即可求出弹体侧滑角 β , 利用向量几何的知识可求得:

$$\beta = 90^\circ - \arccos(\sin\theta\cos\alpha). \quad (1)$$

试验弹丸是回转体轴对称模型, 且飞行过程中无自旋, 故讨论时只考虑侧滑角大小的影响。试验中多次进行射弹 8° 入水角相同发射条件下斜入水试验, 试验测得入水初速 v_0 范围 $640 \sim 655 \text{ m/s}$, 速度变化较小, 可忽略速度变化所导致的影响。因射弹加工误差装弹后弹身在膛内存在微小偏斜和火药气体对弹身的冲击作用, 弹体入水时侧滑角会随机出现相应的变化, 其范围处于 $0^\circ \sim 20^\circ$, 而在 $2^\circ \sim 7^\circ$ 范围内变化的重复性较好。选取侧滑角近似线性变化的 4 种典型试验工况作对比分析, 表 1 为选取的工况参数。

表 1 试验工况参数

Tab. 1 Parameters for different experimental conditions

工况参数	序号			
	1	2	3	4
ω/g	18	18	18	18
$v_0/(m \cdot s^{-1})$	642	653	647	644
$\alpha/(^\circ)$	8	8	8	8
$\theta/(^\circ)$	2.44	7.13	11.18	15.26
$\beta/(^\circ)$	2.4	7.1	11.1	15.1

注: ω 为装药量。

2 试验结果与分析

2.1 不同工况下水弹道特性

根据试验中弹体入水时侧滑角的不同来对比分析弹道特性。图 5 是 β 为 2.4° 时上方和侧方高速摄像拍摄的射弹入水过程, 可见高速射弹在 1 ms 内即可完成入水过程。弹体自右向左于 $1.58 \sim 1.83 \text{ ms}$ 间撞击水面, 射弹在跨介质冲击瞬间 (1.83 ms) 将部分能量传递给弹头附近水域, 水域流体质点获得远离冲击接触面的动量, 使得水面上弹头前方和弹肩两侧立即出现白色的雾状喷溅, 并逐渐形成左右近似对称的“蝶”状水幕(沿射弹飞行方向观察)。射弹于 2.16 ms 完全进入水中, 自弹头部向后诱导生成包裹整个弹体的空泡, 空泡壁光滑, 空泡透明度较高, 空泡包裹的弹体与入水前相比姿态没有明显变化。

观察图 5(b) 可知, 弹体入水瞬间沿着弹体飞行方向水面上出现向前翻卷的“鳍状”喷溅, 弹体在入水空泡内存在尾部向下倾斜的现象。原因是小入水角下, 弹头圆锥段斜面与水面的拍击为弹体提供一个顺时针的力矩, 整个弹身出现微小的顺时针偏转。总体来看, 该工况下弹体入水过程较为理想, 空化效果明显, 入水能形成包裹射弹透明度较高的稳定空泡, 冲击过程中弹体未发生较大偏转翻滚, 弹道轨迹未明显弯曲。

图 6 为弹体侧滑角逐渐增加时射弹以 8° 角入水过程的俯视图。相比工况 1, 随着 β 的增加, 射弹与空泡壁碰撞强度逐渐增加, 入水空泡内白色雾滴

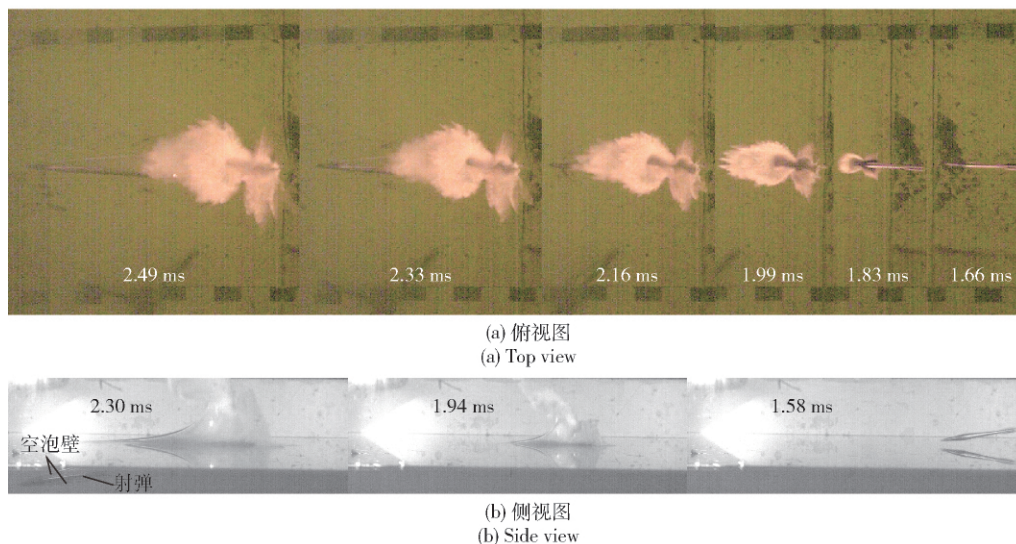


图 5 侧滑角为 2.4° 时射弹入水过程

Fig. 5 Water entry of projectile for $\beta = 2.4^\circ$

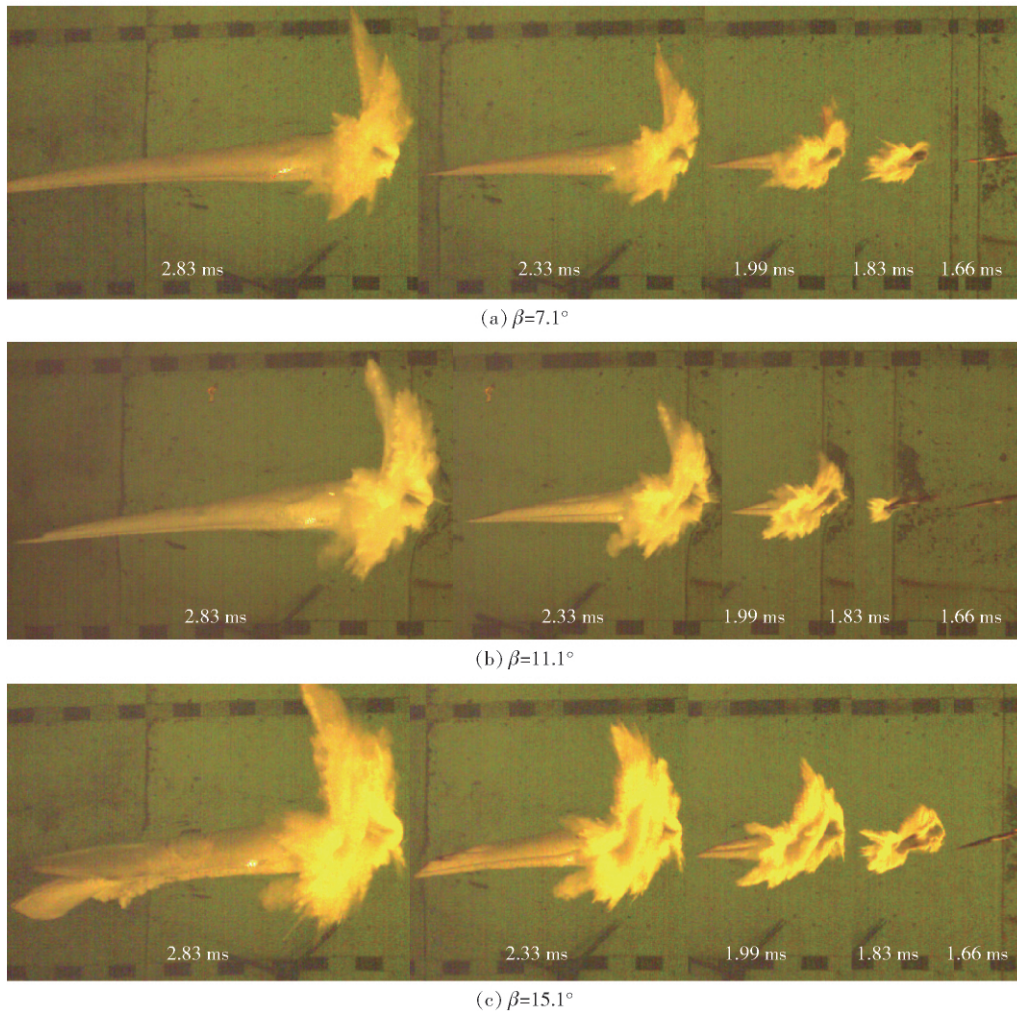


图 6 不同侧滑角下射弹入水过程(俯视图)

Fig. 6 Water entry processes of projectile at different sideslip angles (top view)

逐渐增多,透明度逐渐下降,射弹轮廓不清晰,空化效果较差,弹道弯曲程度逐渐增大。 β 增加至 15.1° 时,弹体在 $2.33 \sim 2.83$ ms间出现了碎裂分解。

分析认为:入水 β 增加,弹身过度倾斜使单侧弹身与空泡壁面持续接触,弹身左右两侧持续受力不均匀,给弹体提供侧向加速度,致使弹体轨迹发生偏转。倾斜的弹身使弹体与水冲击接触面积增大,瞬间冲击载荷的增加,加上运动过程中弹身持续受力不均匀,弹身产生的弯曲变形进一步超过弹体结构强度,使弹体发生碎裂。弹头的倾斜和弹身与空泡壁的接触使得空化器作用被减弱,空化效果变差,空泡内充满雾化液滴,给弹体运动稳定增添更多干扰因素。

由于空泡包裹下无法准确测得射弹质心位移,故采用弹头前端在 x 轴和 z 轴方向上位移来表征射弹在俯视平面内的纵向和侧向运动轨迹,即实际弹道轨迹在水平面(Oxz 平面)上的投影,如图7所示,

射弹运动方向为自右到左,星号表示入水点位置。由图7可以看出4种工况下4个入水点在 z 轴方向上距离最大相差 0.05 m,占水池宽的 2.1% 。在 x 轴方向上距离最大相差 0.28 m,占水池长的 0.8% ,可见发射过程虽受膛口扰动影响,射弹仍能保证较高精度的入水点。通过对比出膛口与入水时的弹道轨迹,可知入水前弹体运动轨迹 z 轴方向上最大偏转的工况为 $\beta = 15.1^\circ$,其值为 0.02 m,占水池宽的 0.8% ,在可接受的误差范围内,表明在膛内扰动的影响下,虽然射弹飞出枪口出现初始侧滑角,但其在空中阶段的运动仍较为稳定。

4种工况对比可知:入水后 $\beta = 2.4^\circ$ 的工况下弹道偏转最小,几乎为直线,整个过程保持着较好的稳定性;而随着入水 β 的增加,另外3种工况下的弹体运动轨迹在 z 轴方向的偏转范围和曲率均随之增大,表明入水 β 在一定范围内(约小于 2.4°)对射弹斜入水过程的稳定性影响较小, β 超过临界值时,弹

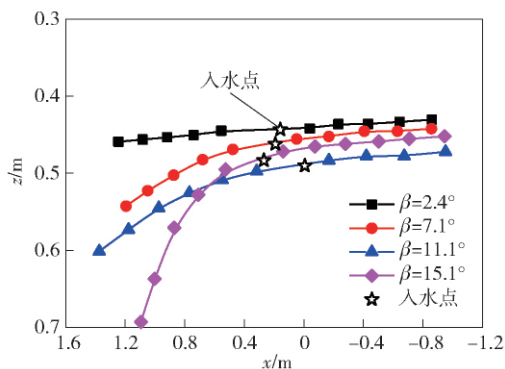


图 7 不同侧滑角下射弹弹头在俯视平面内的运动轨迹

Fig. 7 Experimental motion tracks of projectile nose at different sideslip angles in top view

体入水后弹道就会发生偏转甚至结构损坏,而弹道偏转的严重程度由入水 β 的大小决定。

综上所述,射弹以 8° 入水角高速斜入水时,弹头圆锥段斜面与水面的冲击提供了顺时针力矩诱使空泡内弹尾的向下倾斜。 β 主要影响弹体入水瞬间和入水后的运动,对空中运动的影响不大。射弹在小侧滑角入水时仍能出现透明和对称性较好的空泡并在水下运动时保持弹道稳定。 β 超过临界值时,则易造成空化效果减弱,空泡内出现大量雾滴,入水后弹道轨迹发生偏转弯曲。 β 进一步增大甚至会威胁弹体结构的完整性,入水过程的不稳定性也越严重。

2.2 不同工况下入水喷溅变化特性

根据试验中弹体入水时 β 的不同来对比分析入水冲击引起的喷溅变化过程。图 8(a) ~ 图 8(d) 分别为 4 种不同工况入水喷溅在俯视平面 (Oxz 平面) 演化过程,为便于比较分析,喷溅轮廓坐标均以各工况下的入水点为参考原点。图 8 中定义 L 和 W 分别为同一时间点喷溅在 Oxz 平面内轮廓的最大长度和最大宽度。

分析 4 种工况下喷溅演化过程可知,射弹以 8° 角高速入水冲击引起的喷溅可分为前后两部分,如图 8 所示。前部分喷溅由弹头空化器面冲击水面形成,有向弹道前方和左右侧方运动的趋势;后部分喷溅则是因入水角较小,由弹头圆锥段斜面与水面拍击形成,有向弹道后方和左右侧方运动的趋势。将各时间点前后两部分喷溅分界点的坐标连线(图 8 中黑色粗虚线),发现分界点运动轨迹在 $\beta = 2.4^\circ$ 时近似为 2 条共端点的射线,锥角指向弹道后方。随着 β 增加,分界点连线扭曲度增加,但整体弯曲方向仍指向弹道后方。

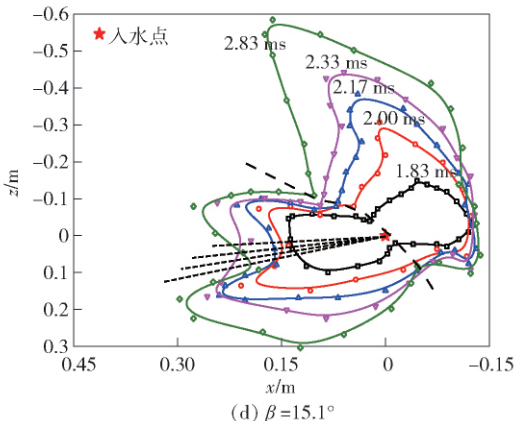
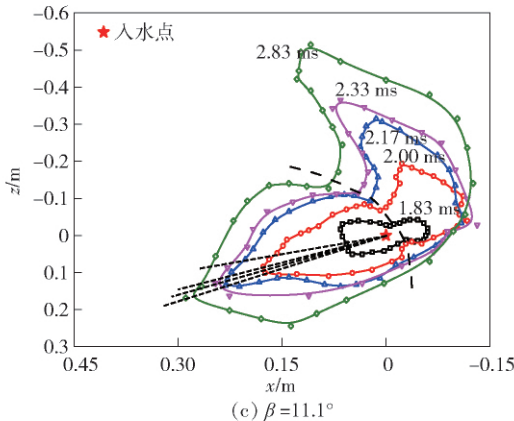
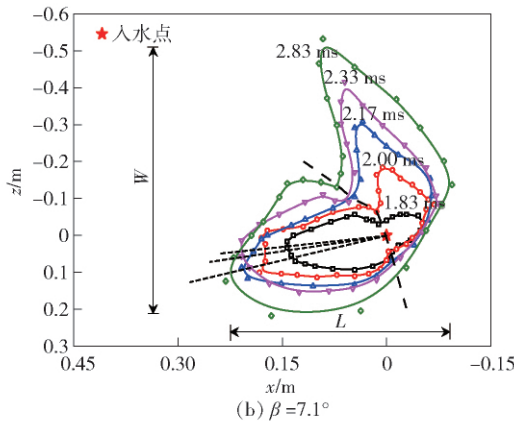
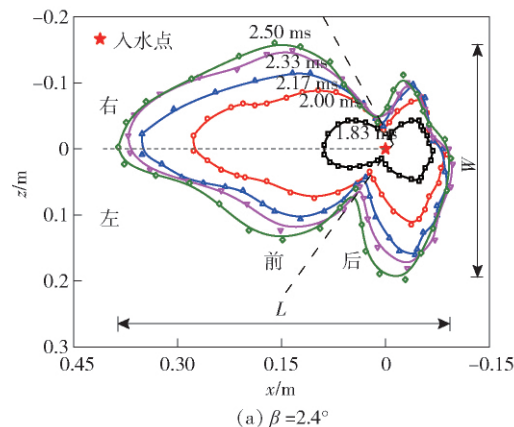


图 8 不同侧滑角俯视平面下入水喷溅变化过程

Fig. 8 Development of splash at different sideslip angles in top view

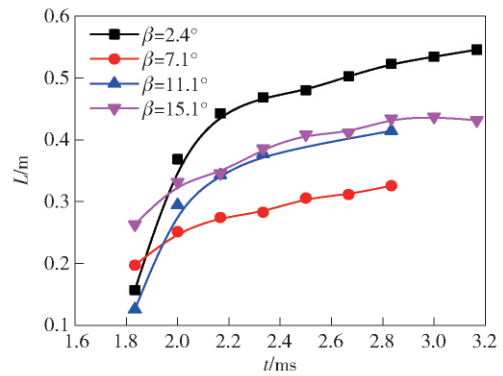
前半部分喷溅在演化过程中 $\beta = 2.4^\circ$ 时对称面近似为过入水点的 Oyz 平面。随着 β 增加, 喷溅对称面会出现偏转, 偏转方向与 β 方向一致。喷溅左右形状也会有所偏差, 但总体来看左右对称性较好。后半部分喷溅随射弹浸水深度增加出现明显左右不对称的现象, 主要是弹体侧滑角的存在使入水冲击时左右水面与弹身面接触面积不一致, 靠弹身倾斜的一方(图 5 中为弹肩左侧) 流体质点获得更多的动能, 故后半部分弹尾倾斜方向的喷溅运动速度较高, 范围较大, 且后半部分喷溅的不对称性随 β 增加愈加明显。这也表明了入水侧滑角对弹肩两侧撞击水面引起的后半部分喷溅的左右对称性影响较大, 对弹头空化器冲击水面形成的前半部分喷溅的左右对称性影响较小。可以推论当弹体以 0° 侧滑角斜入水时, 水面上会形成左右对称性更好的喷溅。

图 9 为不同 β 下喷溅轮廓在 Oxz 平面内最大长度和宽度随时间变化图。对比可知: 喷溅最大长度和宽度在 4 种工况下随时间变化趋势基本一致, 长度在入水前期增长较快, 后期趋于平缓; 宽度变化则无明显前后的区别, 整体缓慢增长, 增速逐渐减小。 $\beta = 2.4^\circ$ 时喷溅长度在后期最大, 宽度最小。结合 2.1 节试验图 5 和图 6 可知 β 增大致使射弹入水喷溅由较理想的对称发展过程转为非对称发展过程, 喷溅最大长度急剧变小后在非对称发展过程中随着 β 继续增大又逐步升高, 而最大宽度急剧增大后在非对称发展过程中受 β 变化的影响较小。

2.3 不同工况下水下压力波变化特性

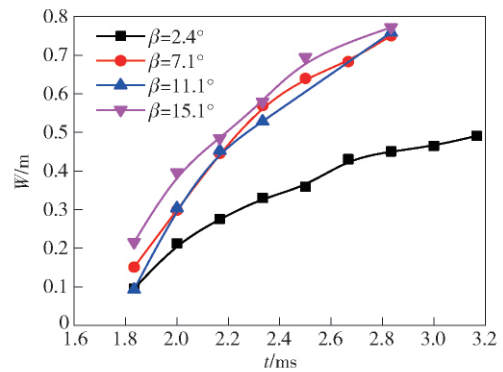
弹体高速入水过程中, 弹身与自由液面的拍击、超空泡的形成和溃灭等均会引起周围水域的激烈波动, 并诱导产生水下压力波。此类压力波强度比普通水下声波高, 瞬时冲量大, 但其传播形式与普通水下声波相同。与水下爆炸产生的冲击波相比, 该压力波波强和冲量均有所减弱, 可以认为是介于二者之间的一种高强度水下声波, 研究其变化规律对提高水下航行器稳定性和隐身性能均有重要意义。试验中采用沿弹道轨迹左侧等距成对布置测压点的方法, 测量射弹斜入水冲击瞬间水下压力波动, 由于 B 组传感器靠近墙壁, 压力信号存在较多干扰, 本文仅就 A 组压力信号来分析弹体不同 β 下入水冲击引起的水下压力变化规律。

图 10 为 4 种工况下 A_1 传感器测得的压力波信号, 压力幅值 p 自射弹入水后均出现明显陡增后缓慢下降的过程, 后期信号波动剧烈。整个过程压力信号变化特征一致且信号峰值均出现在 2.5 ms 附



(a) 喷溅最大长度变化图

(a) Maximal length of splash



(b) 喷溅最大宽度变化图

(b) Maximal width of splash

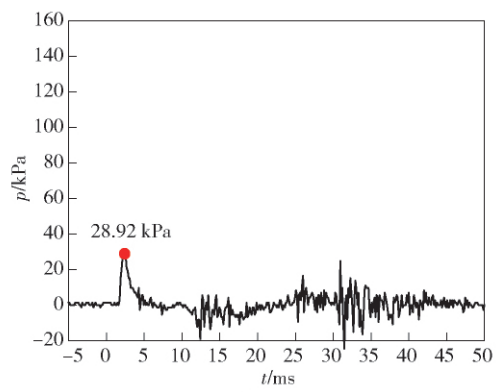
图 9 不同侧滑角入水喷溅轮廓俯视平面内尺寸变化

Fig. 9 Overall dimension of splash at different sideslip angles in top view

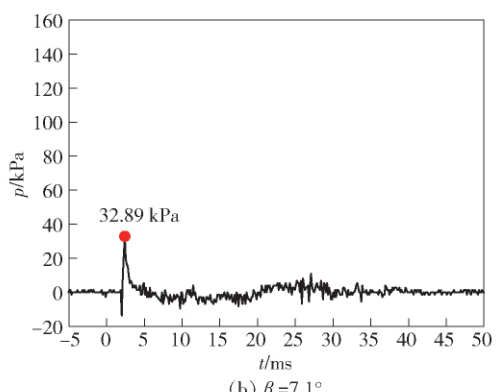
近, 可以判断该峰值表现的是入水冲击产生的初始水下压力波强度。压力峰值随 β 增大而显著增加, 试验中随着 β 增大, 入水冲击时射弹与液面接触面积增大, 瞬时传递的能量增多, 故冲击形成的压力波强度也显著增强。

图 11 为弹体不同入水 β 入水冲击引起的水下 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 测压点压力波动信号。沿着弹道方向水下压力总体变化趋势是: 在射弹入水瞬间压力先陡增后幅值缓慢下降, 后期处于高频脉动过程,

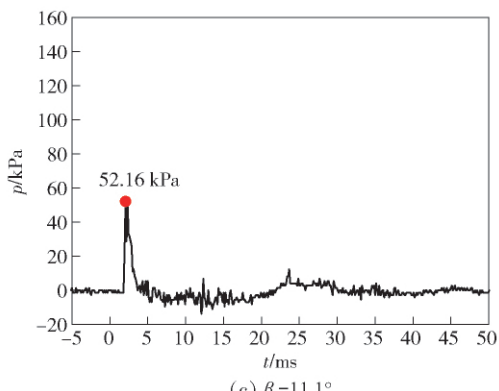
压力幅值变化范围较大。根据压力信号变化特征可将整个变化过程分成 2 个阶段: 一是入水初期初始压力波动阶段 I, 发生在入水瞬间(0 ~ 10 ms), 波形较为规则, 有明显的压力先陡增后缓慢下降的过程, 正压幅值较高, 负压幅值较小; 二是后期($t > 10$ ms) 压力高频脉动阶段 II, 各种压力信号会从各个方向经过不同路径抵达测压点, 如空泡溃灭引起的压力波、水面和池壁反射波等, 致使测量幅值随机起伏较大, 存在信号时延扩散^[18]现象, 后期因能量逐渐消耗而消失。对比不同 β 压力信号发现: 随着



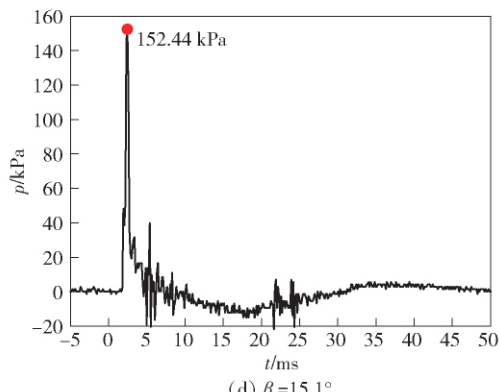
(a) $\beta = 2.4^\circ$



(b) $\beta = 7.1^\circ$



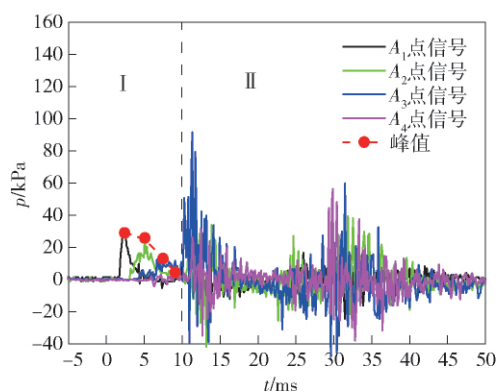
(c) $\beta = 11.1^\circ$



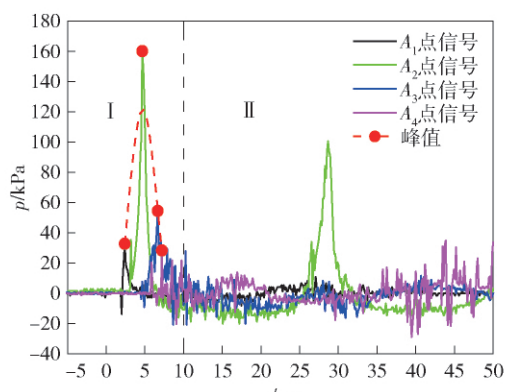
(d) $\beta = 15.1^\circ$

图 10 不同入水侧滑角入水冲击瞬间 A_1 测压点水下压力波动信号

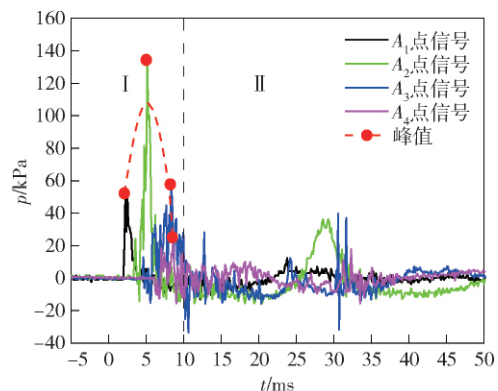
Fig. 10 Underwater pressure signals monitored by the transducer A_1 after the water-entry impact at different sideslip angles



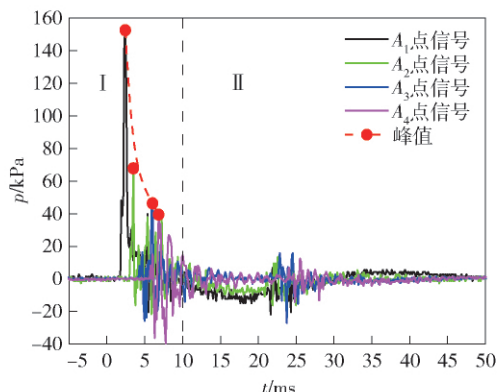
(a) $\beta = 2.4^\circ$



(b) $\beta = 7.1^\circ$



(c) $\beta = 11.1^\circ$



(d) $\beta = 15.1^\circ$

图 11 不同入水侧滑角入水冲击瞬间水下压力波动信号

Fig. 11 Underwater pressure signals induced by the water-entry impact at different sideslip angles

β 的增大, 压力高频脉动阶段 II 的整体幅值和脉动强度会逐渐减小, $\beta = 2.4^\circ$ 时, 压力脉动整体幅值最大, 脉动明显; $\beta = 15.1^\circ$ 时压力脉动整体幅值最小, 波动趋于平缓。

试验中观测到 4 种工况下入水空泡尾部均在 15 ms 以后开始收缩溃灭, 故初始压力波动阶段 I 不存在空泡溃灭的干扰。观察 0 ~ 10 ms 数据可知, β 为 2.4° 和 15.1° 的工况下, 压力峰值的衰减过程较为一致, 沿着弹道轨迹方向 4 个测压点压力峰值逐一衰减, 最靠近入水点的 A_1 传感器最先感受到第一个压力波峰, 随后 A_2 、 A_3 、 A_4 传感器接收到压力波峰, 且随着时间压力峰值逐渐衰减, 没有出现峰值再次增大的情况, 表明在初始压力波动阶段 I 压力波在沿弹道方向传播时反射叠加的影响较小。但相较而言 $\beta = 15.1^\circ$ 的工况压力峰值较高, 压力波强度较大, 衰减速度较快。对比分析 2.1 节中 4 种工况下入水试验现象可知: $\beta = 2.4^\circ$ 时, 入水超空泡形成较好, 弹体被完整地包裹在空泡内, 0 ~ 10 ms 的压力波主要由弹头空化器与前方水域冲击产生, 二者接触面积较小, 扰动形成的压力波也较小, 且过程中弹道较稳定未出现无其他强烈的扰动源, 故压力波峰值会逐渐衰减; 而 $\beta = 15.1^\circ$ 的工况基本未形成入水超空泡, 弹体出现严重的倾斜, 冲击时弹体速度最高且与水域接触面积最大, 整个过程可看作是弹体在水中阻力作用下速度迅速衰减的过程, 故压力波初始峰值最高, 沿着弹道方向传播逐渐衰减。

而 $\beta = 7.1^\circ$ 和 11.1° 的 2 种工况下, 初始压力波动阶段 I 均出现测压点峰值先升高后逐渐降低的过程, 根据工况 1 和工况 4 该阶段压力波反射叠加的影响较小, 且 4 种工况测压点接收到压力信号时间基本一致, 可以认为 β 为 7.1° 和 11.1° 的 2 种工况下该阶段压力波反射叠加的影响亦较小, 测压点峰值先升高后降低表明该时间段出现强烈扰动源。如图 6(a)、图 6(b) 所示, 试验中 β 为 7.1° 和 11.1° 的工况入水空泡形成初期, 入水冲击时弹身与水面接触较少, 扰动较小, 故 A_1 点测得初始压力波峰值较小, 与工况 1 测得的压力幅值和信号接收时间基本一致。但随着弹道的逐渐弯曲, 弹体逐渐倾斜致使弹身与水域接触面积增大, 超空泡内出现大量白色雾滴致使扰动增多, 试验中 2 种工况的射弹均掉落在靶前池底并未上靶, 可以推测随着弹道稳定性继续降低, 弹体中途失稳滑行掉落在池底, 失稳时射弹受水阻力作用速度迅速衰减, 同时形成强烈的扰动源, 产生新的强压力波信号, 这与工况 4 的压力波形

成过程较为相似。由于整个过程时间较短, 新压力波信号会覆盖初始入水冲击产生的逐渐衰减的压力波信号, 故测压点 A_2 、 A_3 、 A_4 会测得新一轮压力峰值衰减过程。

3 结论

本文通过开展超空泡射弹小入水角高速斜入水试验, 研究了入水冲击瞬间弹体姿态对喷溅形成、弹道轨迹变化和水下压力波传播的影响。得出以下结论:

1) 射弹以 8° 角高速斜入水时 β 对入水空泡空化效果、弹道稳定性和结构完整性有重要影响。小 β 下, 射弹高速入水能形成较光滑透明的入水空泡和稳定的入水弹道, 较大的 β 易造成空泡内严重雾化、弹道轨迹偏转和弹体损坏等现象, 严重程度随 β 增大而增大。

2) 射弹以 8° 角高速斜入水时, 小 β 下弹头空化器及圆锥段斜面与水面的冲击使得入水喷溅在俯视下呈左右近似对称的“蝶”状, β 对前半部分喷溅的左右对称性影响较小, 对后半部分的喷溅对称性和范围影响较大。前半部分喷溅的对称轴随着 β 增大会出现相应偏转。

3) 射弹入水过程中水下压力波变化过程可分成初始压力波动阶段和各压力波叠加的压力高频脉动阶段。初始压力波动阶段因 β 增加后入水状态的不同呈现不同的变化特征, 高频脉动阶段压力的整体幅值和脉动强度随 β 增大会逐渐减小。

参考文献 (References)

- [1] WORTHINGTON A M, COLE R S. Impact with a liquid surface, studied by the aid of instantaneous photography [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 1900, 194: 175 - 199.
- [2] RICHARDSON E G. The impact of a solid on a liquid surface [J]. Proceedings of the Physical Society, 1948, 61(4): 352 - 367.
- [3] MAY A, WOODHULL J C. The virtual mass of a sphere entering water vertically [J]. Journal of Applied Physics, 1950, 21(12): 1285 - 1289.
- [4] TRUSCOTT T T, TECHET A H. Water entry of spinning spheres [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 625: 135 - 165.
- [5] 陈先富. 弹丸入水空穴的试验研究 [J]. 爆炸与冲击, 1985, 5(4): 70 - 73.
CHEN X F. Experimental studies on the cavitation phenomena as a pellet entering water [J]. Explosion and Shock Waves, 1985,

- 5(4): 70-73. (in Chinese)
- [6] 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.
ZHANG W, GUO Z T, XIAO X K, et al. Experimental investigations on behaviors of projectile high-speed water entry[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(6): 579-584. (in Chinese)
- [7] 杨衡, 张阿漫, 龚小超, 等. 不同头型弹体低速入水空泡试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(9): 1060-1066.
YANG H, ZHANG A M, GONG X C, et al. Experimental study of the cavity of low speed water entry of different head shape projectiles[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(9): 1060-1066. (in Chinese)
- [8] 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 L R, WEI Y J, WANG C, 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)
- [9] 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.
WANG Y, YUAN X L, LÜ C. Experimental research on curved trajectory of high-speed water-entry missile[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(12): 1998-2002. (in Chinese)
- [10] 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): 617-624.
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): 617-624. (in Chinese)
- [11] 蒋运华, 徐胜利, 周杰. 圆盘化器航行体入水空泡实验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(3): 241-246.
JIANG Y H, XU S L, ZHOU J. Water entry experiment of a cylindrical vehicle with disc cavitator[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3): 241-246. (in Chinese)
- [12] JIANG Y H, BAI T, GAO Y, et al. Water entry of a constraint posture body under different entry angles and ventilation rates[J]. Ocean Engineering, 2018, 153: 53-59.
- [13] 周杰, 徐胜利, 彭杰. 弹丸高速斜侵入水流场显示的初步研究[J]. 高压物理学报, 2018, 32(1): 132-139.
ZHOU J, XU S L, PENG J. Water entry flow-field visualization of the oblique penetration of a high-speed projectile[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(1): 132-139. (in Chinese)
- [14] 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.
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. (in Chinese)
- [15] CHEN C, YUAN X L, LIU X Y, et al. Experimental and numerical study on the oblique water-entry impact of a cavitating vehicle with a disk cavitator[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2019, 11(1): 482-494.
- [16] CHEN T, HUANG W, ZHANG W, et al. Experimental investigation on trajectory stability of high-speed water entry projectiles[J]. Ocean Engineering, 2019, 175: 16-24.
- [17] TRUSCOTT T T, BEAL D N, TECHET A H. Shallow-angle water entry of ballistic projectiles[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation. Ann Arbor, MI, US [s. n.], 2009: 1-14.
- [18] 樊国勇. 浅海水声信道均衡算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 14-15.
FAN G Y. The research on equalization algorithm for shallow water acoustic channels[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013: 14-15. (in Chinese)