

非对称头型航行器入水空泡形态与弹道特性的实验研究

华扬^{1,2}, 施瑶^{1,2}, 潘光^{1,2}, 黄桥高^{1,2}

(1.西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072;
2.西北工业大学 无人水下运载技术重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘 要:头部形状对航行体的入水弹道和空泡形态有着显著的影响,为研究非对称头型在入水过程中空泡和弹道的演变特性,基于高速摄影技术,对带有 35°,40°,45°不同切角头型的航行体开展了不同入水角条件下的低速入水对比实验。通过数字图像处理技术提取不同时刻下航行体的入水空泡轮廓以及运动姿态信息,得到了非对称头型航行体切角大小和入水角度对入水空泡和弹道轨迹的影响规律。实验结果表明:非对称头型切角侧能有效促进空泡的扩张从而形成不对称入水空泡;空泡扩张规模与空泡初始水平扩张速度和头型截切的切面区域面积正相关;非对称头型航行体入水弹道会向非切角侧偏转,且头型切角越小弹道偏转幅度越大,姿态角减小也越快;入水角越小,弹道拉平所需要的时间越短,拉平深度也越浅。

关 键 词:流体力学;非对称头型;航行器;入水;空泡;实验研究

中图分类号: O352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2758(2021)06-1249-10

入水过程指的是运动体自空中以一定速度自由砰击水面并进入水介质的过程,在这个过程中,运动体能够将部分能量传递给附近的流体从而使得流体产生径向向外的流动并形成入水空泡。运动体入水现象在军事和海洋工程领域十分常见,如空投鱼雷、超空泡射弹、海洋平台立柱等^[1-4]入水过程。由于入水空泡的存在,运动体表面往往处于部分沾湿的状态,其流体动力特性非常复杂。在实际的入水过程中,人们发现许多入水导弹和鱼雷入水后会出现弹跳、忽扑、沉底等失稳弹道,影响武器的打击效果^[5-7],因此许多研究者展开了对细长体入水空泡和弹道问题的研究与分析。

陈国明等^[8]进行了不同速度和角度下的航行器斜入水跳弹现象研究,并给出了预测航行器跳弹和下沉的经验公式。Xia 等^[9]通过入水实验研究了不同水平速度、入水角和迎角条件下圆柱体入水空泡和弹道轨迹,发现当迎角大于 22°时,圆柱的倾斜

角随着深度增加而迅速减小。Eroshin 等^[10]推导了圆柱体在高速入水的冲击载荷、应力分布和入水初期的弹道轨迹的计算模型。Mirzaei 等^[11-12]基于空泡独立扩张原理建立了一种新的瞬态空泡模型,可以预测圆柱体入水后的空泡的轮廓外形,同时考虑了空泡对运动体的影响,给出了弹道轨迹的预测模型。

人们在研究过程中发现,通过改变细长体的头部形状,可以显著影响细长体入水后的空泡特性和弹道轨迹。杨衡等^[13]记录了圆头和 90°~150°锥头弹体入水过程,发现锥头更容易生成空泡,且随着锥角的变化,空泡的尺寸和闭合方式也发生改变。课题组^[14]研究了不同半球角的对称头型在不同入水角度和速度下空泡形态的演变,发现入水速度和入水角度均会改变表面闭合发生的时间,从而影响深闭合点的发生时间和深度。罗驭川等^[15]发现截锥体头型弹丸入水空泡直径随着头部直径增大而增

收稿日期:2021-03-31

基金项目:国家自然科学基金(51709229)资助

作者简介:华扬(1997—),西北工业大学硕士研究生,主要从事跨介质水动力学研究。

通信作者:施瑶(1988—),西北工业大学副研究员,主要从事高速水动力学研究。e-mail: shiyao@nwpu.edu.cn

大,但对空泡深闭合时间几乎没有影响。王云等^[16]利用高速摄像机拍摄了椭圆斜截头非对称弹体入水和空泡形态演变过程,发现椭圆斜截头弹体由于其特殊的头部更容易产生偏向水面的弯曲弹道。目前大多数入水研究都针对于轴对称运动体入水过程,但是对于非对称运动体入水后弹道偏转与空泡演化机理的相关研究较少。在此背景下,本文基于高速摄像方法,通过开展不同构型非对称头型的航行器入水冲击实验,对入水空泡进行轮廓提取并分析对比不同条件下入水空泡与弹道轨迹发展过程,为空投航行器入水快速拉平的弹道设计提供参考。

1 实验方法和实验方案

1.1 实验模型

实验模型的头型设计如图 1 所示,其中 δ 为头型切距, α 为头型切角, L_0 为模型全长, D_0 为模型直径,在本实验中头型切距是固定值为 $\delta = 10\text{ mm}$ 。由于本文需要研究切角头型对入水过程的影响,因此无切角头型即平头头型也一并列入实验对象。实验模型的参数和入水参数如表 1 所示。

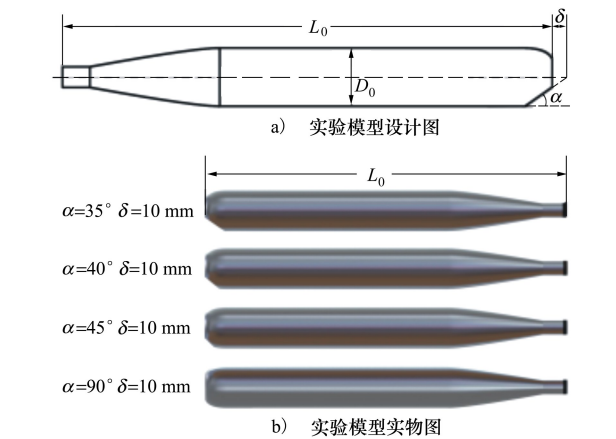


图 1 实验模型示意图

表 1 模型参数

参数	值
模型总长 L_0/mm	344
模型直径 D_0/mm	40
头型切距 δ/mm	10
头型切角 $\alpha/(\text{^\circ})$	35, 40, 45
入水速度 $U_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	9.93±0.1
入水角度 $\theta/(\text{^\circ})$	60, 70, 80, 90
弗劳德数 Fr	7.87~19.50
雷诺数 Re	195.6~446.4

1.2 实验装置

本文所做入水实验均在透明水箱中进行,实验装置示意图如图 2 所示,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。实验所用水箱主体由有机玻璃粘合而成,四周壁面透明,便于高速摄像机拍摄入水过程。水箱框架由钢架焊接而成,可以防止因为水压过大而导致水箱破裂的问题。水箱的尺寸为 $1\,840\text{ mm}\times1\,200\text{ mm}\times1\,240\text{ mm}$,有机玻璃的厚度为 20 mm ,水箱中水深为 0.85 m 。为清晰捕捉模型入水后的空泡形态,在水箱背面布置 2 盏 500 W 照明灯用于实验光源,同时在水箱背面贴有带网格的背景纸用于均匀分布光线以及尺寸标定。通过丝杠可以调节发射管的角度,以完成不同的入水角发射,同时通过更改储气罐内的压强大小从而改变入水的速度大小。在实验中,高速摄像机的分辨率 $1\,216\times1\,024$,帧速 $2\,000\text{ frame/s}$,曝光时间 $200\text{ }\mu\text{s}$ 。

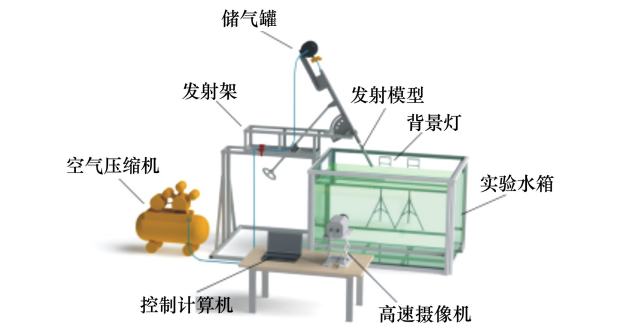


图 2 实验装置示意图

为了获得精确的实验模型入水速度,在高速摄像机软件中对拍摄完成的实验图像进行标定,得到水面上方空气中真实距离和图像像素距离的比值为 1.507 mm/pix ,水面以下液体中真实距离和图像像素距离的比值为 1.388 mm/pix ,通过测量入水前 5 ms 中实验模型头部运动的距离,从而得到模型的入水速度大小。通过对重复实验下的模型入水速度测量发现,模型入水速度的波动误差在 $\pm 2\%$ 以内,故可近似认为相同大小压强下发射的实验模型入水速度相等。实验中对相同条件下的实验工况均重复 3 次,本文中所采用的实验图像能够反映多次重复实验中同样的入水空泡形态特性。

为了更加清晰地对比不同切角头型的入水空泡形态变化,在高速摄像机软件中将实验工况每一帧图像进行保存,构建 MATLAB 代码对图像进行数字图像处理。首先将实验图像导入并读取,在设置适

当的阈值下将其转变为二值图像,通过平滑处理去除噪点,消除内部空腔等处理后,利用边缘检测函数对图像空泡的外轮廓进行识别和提取从而获得空泡外轮廓的像素坐标。在像素坐标和实际坐标的转换过程中对液体造成的折射效应进行了校正处理,获得空泡轮廓的实际坐标值。将提取的红色空泡轮廓放入原图中进行对比,如图 3 所示,可见空泡轮廓的识别能很好地贴合真实的空泡外边缘,故认为提取有效。

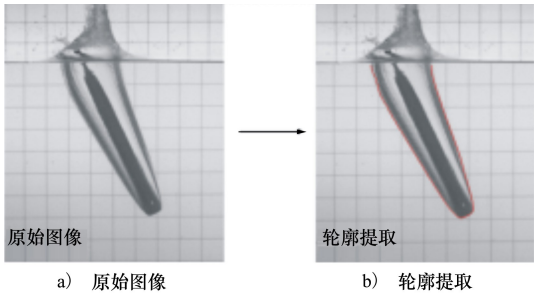


图 3 实验装置示意图

1.3 坐标系定义

图 4 给出了实验模型入水过程坐标系定义示意图,其中 x 轴与气液交界面处重合,模型轴线在入水前与 x 轴的交点为坐标系原点 o , z 轴竖直向上。当模型头部为非对称头型时,为方便描述,定义模型带切角一侧为切角侧,另一侧为非切角侧。其中模型轴线与 x 轴负方向的所成的夹角 θ 为模型的入水角度, U_0 为模型的入水速度。

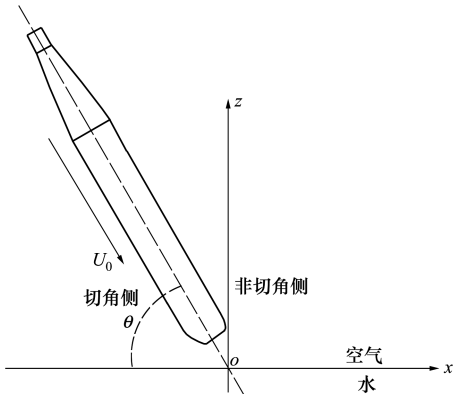


图 4 入水坐标系示意图

2 实验结果分析

2.1 头型对垂直入水空泡的影响

图 5 给出了带有平头头型和 3 种切角头型的实

验模型以 $U_0 = 9.93 \text{ m/s}$ 速度垂直入水后同一时刻下的空泡演变对比图。模型在入水过程中经历了入水砰击、开空泡、空泡闭合以及空泡溃灭 4 个阶段。图中时间零点 $t = 0 \text{ ms}$ 为模型刚接触自由液面的时刻。每张入水工况图片的时间间隔为 8 ms ,随着模型入水速度不断衰减,入水砰击阶段中模型将动能传递给自由液面,排开周围的流体,开始产生入水空泡并形成飞溅。

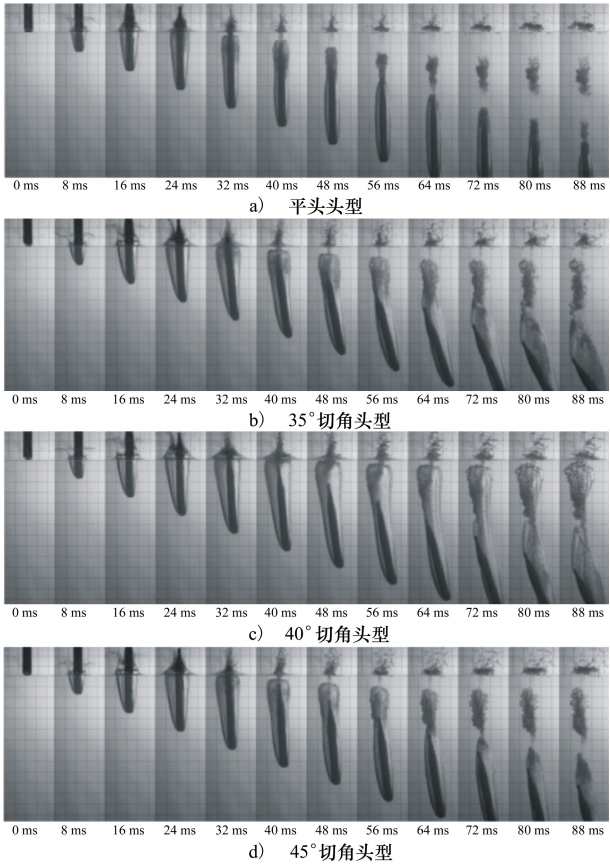


图 5 平头头型和非对称头型垂直入水空泡形态图

为便于描述,将入水空泡分为近液面端空泡和近头部端空泡。其中平头模型入水后在模型轴线附近形成均匀对称的飞溅水幕,随后在压力和表面张力的作用下,水幕顶端向轴线运动,直至贴合模型表面,从而使空泡形成了封闭状态。空泡完成表面闭合后,在压力梯度的作用下,形成指向泡内的射流,使得空泡壁面透明度降低并呈现云雾状 (24 ms)。随着模型继续向下运动,空泡被拉至液面以下,近液面端空泡壁面因受到回射流冲击而逐渐云化溃灭 (32 ms)。空泡扩张至一定程度后在压力和表面张力的作用下,将流体势能转化成流体动能,开始反向收缩 (40 ms)。近液面端空泡在内部回射流和外部

反向流动的共同作用下逐渐收缩溃灭,在 $t = 64\text{ ms}$ 时空泡断裂为上下两部分,且收缩点位于模型尾端,因而下半部分空泡还保持比较完整的空泡形态并和模型继续向下运动。可以观察到空泡尾端在压力梯度作用下产生了新的回射流,并促使模型尾端空泡逐渐云化溃灭(72 ms)。

切角侧能够形成更大规模的飞溅水幕,从而形成不对称的飞溅和开空泡(8 ms),这意味着切角侧的流体介质获得了更高的动能,因而在两侧的水幕顶端均在压力和表面张力的作用下向轴线运动时,非切角侧的水幕率先附着到模型表面(16 ms),而切角侧的水幕在之后一段时间时才与模型表面贴合(24 ms),从而使空泡形成了闭合状态,此时模型已经出现了明显的逆时针偏转现象,且切角侧的空泡半径要明显大于非切角侧。和平头对称模型入水过程相似,近液面端空泡在顶端射流的作用下逐渐云化溃灭(40 ms)。随后模型由于姿态偏转使得模型尾部与空泡一侧壁面碰撞,并在尾部尖端形成了一条明显的条状空泡(64 ms),碰撞处形成高压区,使得附近的流体介质在压力梯度的作用下形成指向空泡的射流,在射流的冲击作用下模型尾端附近的空泡逐渐发生溃灭且溃灭区域迅速扩展至模型头部空泡(80 ms)。对比带有不同切角的非对称头型的入水空泡可以发现,由于姿态偏转幅度的不同,不同切角的模型尾部撞击空泡壁发生的时间随着切角的增大而推迟。

为了直观地对比垂直入水不同头型的入水空泡形态变化,基于边缘检测方法对实验工况中的入水空泡边缘轮廓进行识别与提取,并放置于同一坐标系下进行对比。图 6 给出了平头头型和 $35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 切角头型的实验模型以 $U_0 = 9.93\text{ m/s}$ 速度垂直入水后分别在 $t = 10, 20, 30$ 和 40 ms 时,同一时刻下的空泡轮廓对比图。其中横轴为距入水点的径向距离 x 与模型直径 D_0 的比值,纵轴为入水深度 z 与模型直径 D_0 的比值。

以平头模型的空泡轮廓线为基准,由图 6a) 可见在入水初期 4 种头型的空泡轮廓特征接近一致。观察图 5 中近头部端空泡轮廓,可以发现随着入水深度的增加,切角头型的近头部端空泡逐渐朝未带切角一侧偏转,且偏转幅度随着深度增加而增大。同时在图 6d) 中不同头型的近头部端空泡轮廓之间形成明显的层次规律, 35° 切角头型的近头部端空泡位于最外侧,接下来从外到内依次为 40° 切角头型、 45° 切角头型和平头头型,可见近头部端空泡的偏转幅度随着切角的减小而逐渐增加。而对于近液面端空泡轮廓,可以看到相对于平头头型,切角头型在切角侧的空泡向外扩张规模更大,随着空泡不断被拉长,平头头型的近液面端空泡轮廓开始向内收缩,如图 6c) 所示,这主要是由于空泡表面闭合引起的。由此可以看出切角头型对近液面端空泡的扩张有一定的促进作用,从而推迟空泡的表面闭合。

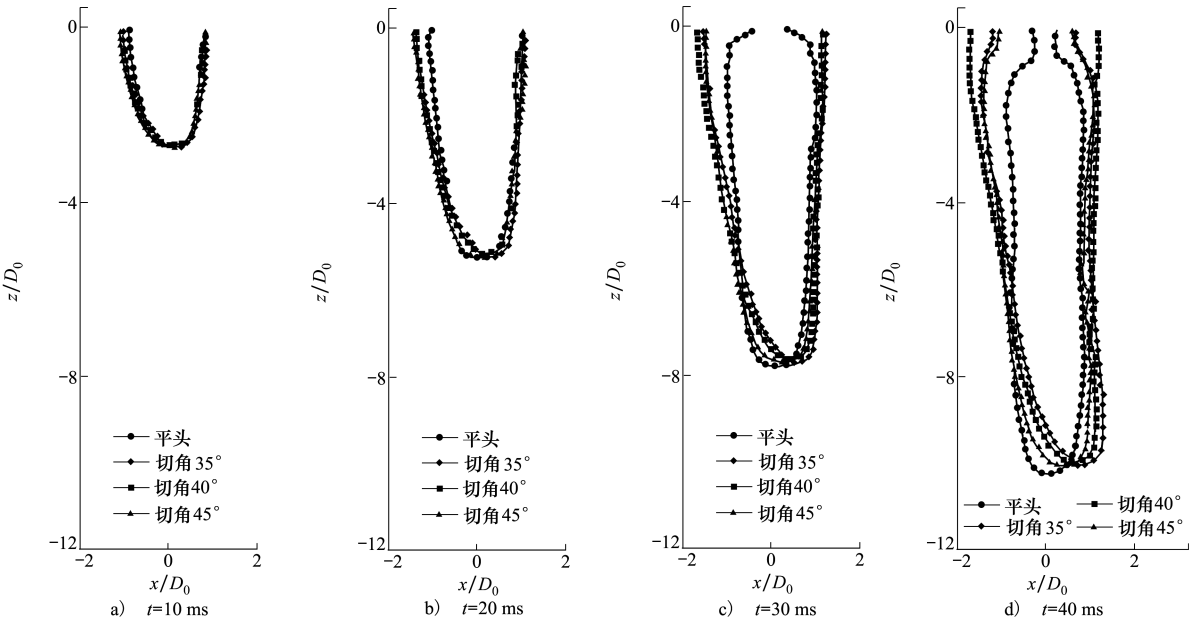


图 6 平头头型和非对称头型入水空泡壁面对比图

为分析非对称头型对入水空泡的影响机理,图7为带有切角头型的模型在垂直入水时的空泡形成示意图。在开空泡形成阶段,周围流体在径向向外流动时,于模型头部边缘处形成流动分离,非切角侧的流动分离点位于B点,为模型头部型线处一点,而切角侧的流动分离点位于A点,从而表明切角侧的表面沾湿区域要大于非切角侧,因而切角侧的流体介质所传递得到的动能要较非切角侧高,致使切角侧的空泡扩张速度和飞溅高度也随之增加。

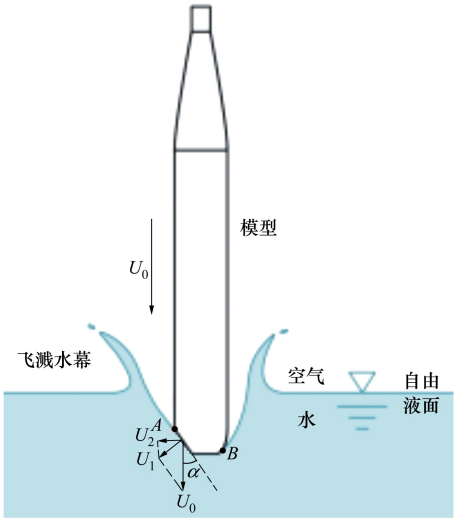


图7 带有非对称头型的模型垂直入水示意图

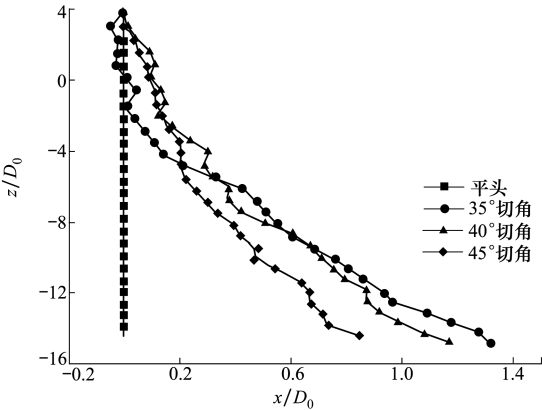
对于不同切角头型的入水空泡切角侧的尺寸差异可作如下解释:空泡于流动分离点处开始扩张,且分离点处的流体介质的绝对速度与模型边界的法向速度相等。航行体的入水速度为 U_0 ,则切角处附近的流体介质的法向速度为 $U_1 = U_0 \sin \alpha$ 。而空泡半径与空泡界面的水平扩张速度相关,因此可得切角处空泡初始水平扩张速度为 $U_2 = U_0 \sin \alpha \cos \alpha$ 。由此可

知当切角为 45° 时空泡初始水平扩张速度最高。在图6a)中近液面端空泡轮廓的切角侧的对比中可以看出, 45° 切角头型切角侧的入水空泡轮廓位于最外侧,接下来从外到内依次为 40° 切角头型、 35° 切角头型和平头头型,这之前的结论相吻合。

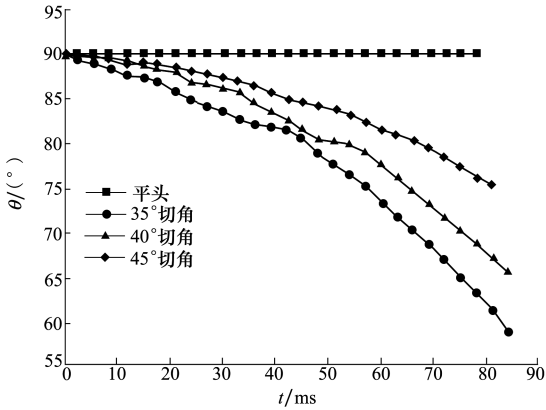
但随着入水时间增加,近液面端空泡轮廓扩张速度减慢,在图6d)中 40° 切角头型切角侧的入水空泡扩展程度最高,随后依次为 35° 切角头型、 45° 切角头型和平头头型。这一现象与之前结论不符的主要原因是空泡扩展半径大小不仅与空泡界面的初始水平扩张速度相关,也与头型截切的切面区域面积相关,即空泡的每个横截面扩张的程度取决于经过此截面的流体介质所获得动能。切面区域面积主要影响到被排开流体的质量,且该面积大小随着切角的增加而减小。因此综合其影响因素, 40° 切角头型相较于其他头型更能促进空泡的扩张。

2.2 头型对垂直入水弹道的影响

为了研究不同切角头型对入水弹道的影响机制,图8给出了平头头型和 35° 、 40° 、 45° 切角头型的实验模型以 $U_0 = 9.93 \text{ m/s}$ 速度垂直入水后模型质心的入水弹道以及水平方向位移、竖直方向位移和模型姿态角随时间的变化对比曲线。其中平头头型入水后弹道基本保持竖直方向且无姿态角偏转,而带有切角的头型入水后弹道轨迹均出现了明显向非切角侧偏转的现象,切角越小的头型在实验记录范围内水平偏转的位移越大。而在 35 ms 之前 35° 切角头型的水平位移要小于其他切角头型,这主要是因为入水初期 35° 切角头型的姿态偏转角较大,致使质心偏向切角侧,然后随着入水深度的增加质心水平位移快速增大,且随着切角的增加,水平位移的增大速度也随之减慢。在竖直位移上切角头型之间



a) 模型质心入水轨迹



b) 模型姿态角

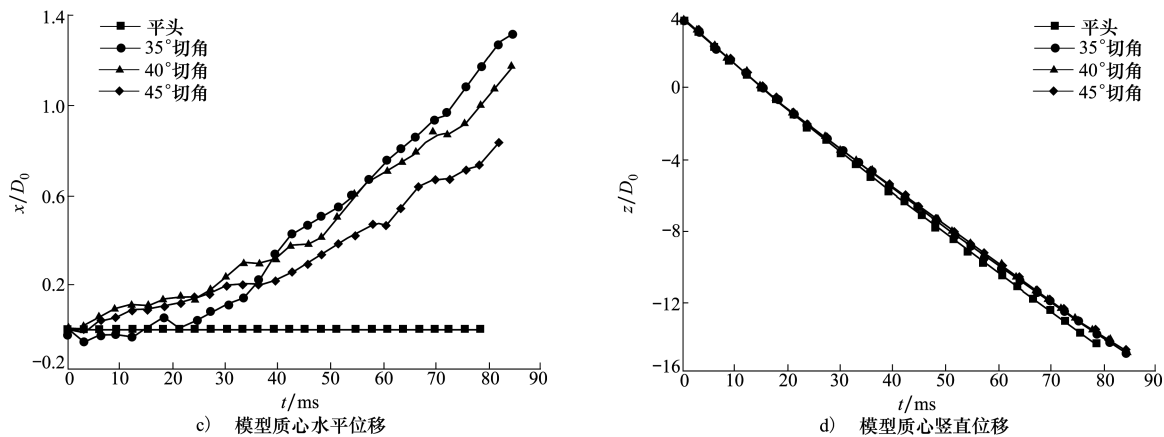


图 8 平头头型和非对称头型入水运动姿态变化图

的差距很小,位移曲线几乎重合,但相较于平头头型竖直位移的增加速度要有所减弱,原因主要是切角头型将部分竖直方向动量分配给了水平方向,从而竖直方向动量也随之减小。

切角头型入水后其姿态角均具有单调减小的趋势,且切角越小姿态角减小越快。可以预见的是,当模型姿态角减小到 0°时,即可达到弹道拉平状态。但在实验记录范围内,由于水箱深度尺寸的限制,未能观测到带切角头型的模型在垂直入水后完成弹道拉平过程。

2.3 非对称头型倾斜入水空泡特性分析

由于在垂直入水工况下切角头型弹道快速拉平状态需要的人水深度和时间较长,因此本文开展了不同入水角条件下 35°切角头型倾斜入水的实验研究。图 9 给出了带有 35°切角头型的实验模型以 $U_0=9.82\text{ m/s}$,入水角 $\theta=60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ 条件下入水后不同时刻下实验图像。在入水撞击瞬间,附近的流体介质将获得的动能转变为势能,在液面上方形成了一圈透明的飞溅水幕,且在小角度入水时 ($60^\circ, 70^\circ$) 飞溅水幕呈现出明显的不对称性 (20 ms)。原因是在倾斜入水过程中,模型具有水平方向的速度分量,因此背水面一侧流体介质获得了更多由模型入水传递的动量,因此能够产生更为强烈的飞溅。在之前的非对称头型垂直入水的飞溅形态分析可知,切角侧能够有效传递流体介质更大的动量从而形成更大规模的飞溅。因而当 35°切角头型以 80° 入水角入水时,切角侧对飞溅形成的促进效应和因模型倾斜入水对背水面飞溅的促进效应几乎相当,从 20 ms 的入水图像可以看出,两侧的飞溅水幕规

模接近于相等。

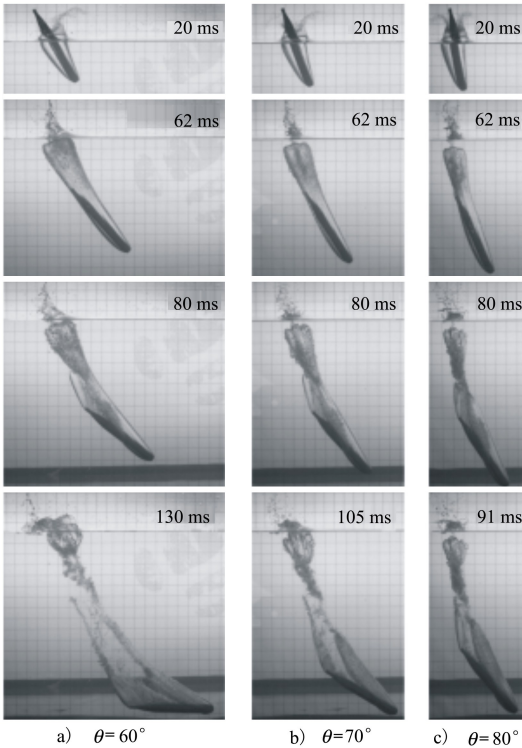


图 9 35°切角头型倾斜入水空泡形态图

流动分离形成后,周围流体介质径向向外流动并将动能转化为势能,在空泡扩张到一定程度后,在流体压力和表面张力的作用下又将势能转化为动能,使得空泡径向向内收缩,如 $t=62\text{ ms}$ 时刻实验图像所示。此时空泡已经出现了明显的颈缩现象,近液面端空泡因空泡表面闭合后产生的射流冲击而使得空泡壁面雾化且透明度下降。此时模型因受到头部的横向偏转作用力而发生姿态逆时针偏转,致使

模型尾部拍击空泡一侧壁面。从实验记录中可以发现不同入水角条件下尾部撞击空泡壁面的时间接近一致。

尾部撞击空泡壁面后,模型尾部边缘处产生新的流动分离现象,使得模型尾部产生新的空泡。随着模型姿态偏转角度增加,模型与入水空泡逐渐分离,且入水空泡因尾部撞击空泡壁处产生的回射流冲击而逐渐溃灭,溃灭区域自碰撞处开始逐渐向模型头部空泡区域扩散。但由于弹体仍存在一定的速度,头部边缘处持续开辟新的空泡,因而模型头部附近的空泡界面保持光滑透明状态。

2.4 非对称头型倾斜入水弹道特性分析

由 35°切角头型以 60°入水角倾斜入水实验图像中可以看出,在 $t = 130\text{ ms}$ 时刻模型轴线基本与水平方向平行,即入水弹道形成了拉平状态,但在其他较大入水角入水实验工况中,由于实验水箱深度的限制,未能在模型触底前完成弹道拉平。因而可以发现小角度入水可以使得带有非对称头型的航行体在较浅的入水深度和较短的入水时间内达到弹道拉平状态。

为了分析切角头型入水后的弹道和姿态偏转机理,图 10 给出了带有非对称头型的模型在倾斜入水后在穿越水平面时和尾部撞击空泡壁面后的受力示意图。在模型穿越水面时,除了受到自身重力 F_G ,头部平面的压差力 F_N 和切角平面的压差力 F_C 以外,还受到因液面飞溅水膜附着在模型切角侧面形成的压差力 F_S ,其中切角平面的压差力 F_C 使模型受到了一个逆时针方向的偏转力矩 M ,且当模型切角侧飞溅水膜附着点高度低于模型质心高度时,压差力 F_S 对偏转力矩 M 有着促进作用,随着模型入水深度增加,飞溅水膜附着点高度高于模型质心高度时,压差力 F_S 对偏转力矩 M 又有着削弱作用。

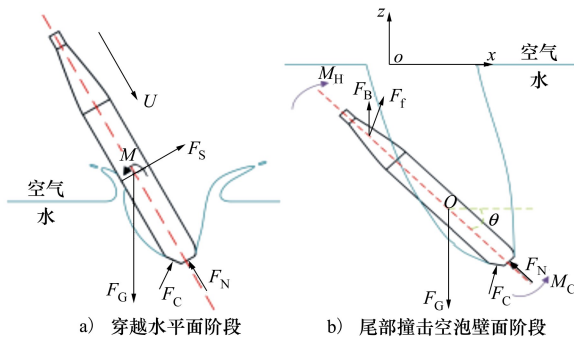


图 10 模型入水过程受力示意图

在模型尾部完全处于液面以下且模型尾部还未撞击空泡壁面时,压差力 F_S 不再作用于模型。在偏转力矩 M 的作用下,模型姿态逐渐发生逆时针偏转,致使模型尾部与入水空泡下侧壁面碰撞,从而模型尾端沾湿面积迅速增加,使得模型额外受到尾端沾湿部分的压差阻力 F_f 和浮力 F_B 作用。这些力一方面使得模型动量迅速减小,另一方面压差阻力 F_f 和浮力 F_B 对模型质心形成了一个顺时针的偏转力矩 M_H ,与头部切面受到的压差力 F_C 所形成的逆时针偏转力矩 M_C 相反,从而阻碍了模型姿态产生更大幅度的偏转。

基于模型倾斜入水过程中的受力分析,为了更进一步揭示非对称头型在不同入水角下倾斜入水的弹道特性,图 11 给出了带有 35°切角头型的实验模型以 $U_0 = 9.82\text{ m/s}$,入水角 $\theta = 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ 条件下入水后入水弹道以及水平方向位移、竖直方向位移和模型姿态角随时间的变化对比曲线。由于不同入水工况下模型的入水角度不同,模型质心在入水初始位置并不重合。

由于这三个实验工况中模型入水速度相等,因此入水角度越小,其水平动量分量也就越大, $\theta = 60^\circ$ 入水角下模型的水平位移较其余大入水角工况迅速增加,但竖直方向位移增加幅度较小,如图 11c) ~ 11d) 所示。随着入水时间增加,在逆时针偏转力矩的作用下,不同入水角下的模型姿态角均呈现单调减小的趋势,但三者姿态角下降曲线接近平行(图 11b))。由此可以得知 35°切角模型在以不同入水角入水的过程中姿态角的变化趋势和幅度几乎相等。这意味着当入水角减小时,35°切角模型可以在更短的时间内使姿态角达到 0° ,即达到弹道拉平状态。其现象产生的原因主要是在不同入水角下以及相同的入水速度条件下,35°切角头型的沾湿表面可近似认为是相同的,这使得航行体头部水动力的合力在航行体坐标系下也是近似相等的,因此在尾部撞击空泡壁面前航行体受到的偏转力矩也近似相同。这使得在 $60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ 入水角下 35°切角模型的姿态角变化幅度接近相等。

尾部撞击空泡壁面后,由于存在尾端沾湿部分的压差阻力 F_f 作用,其水平方向的分力与头部切面的压差力 F_C 的水平分力的合力大于头部平面的压差力 F_N 的水平分力,从而使模型水平方向动量增加,另一方面模型受到合力的竖直分量又使得模型竖直方向动量迅速减小,致使模型质心竖直位移增

加速度逐渐减缓(见图 11d))。因此可知模型入水后其动能一部分传递给流体介质,另一部分动能转

变为模型的旋转动能以及水平运动动能。

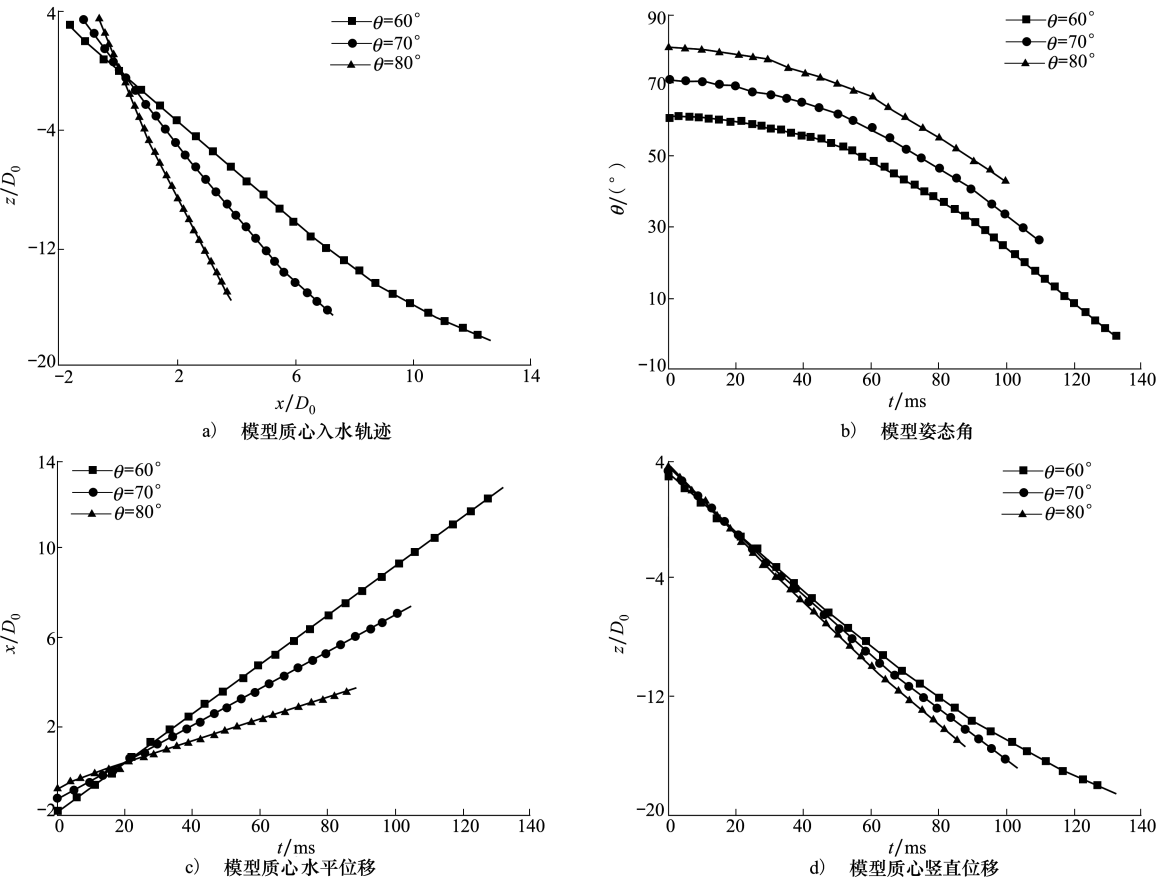


图 11 非对称头型倾斜入水运动姿态变化图

3 结 论

本文基于高速摄像技术开展了不同入水条件下非对称头型入水实验,并利用数字图像处理技术提取不同入水时刻下的空泡形态、模型质心位置以及姿态角,重点分析了在垂直入水和倾斜入水工况下非对称头型对入水空泡和弹道特性演变的影响机理,得出的主要结论如下:

1) 非对称头型对于模型入水空泡有着显著影响,垂直入水时空泡出现明显的不对称特征,头型切

角侧能够有效促进空泡的扩张并推迟表面闭合的时间,且空泡扩张规模与空泡初始水平扩张速度和头型截切的切面区域面积正相关。

2) 带有非对称头型的模型入水后弹道向非切角侧偏转,且头型切角越小弹道偏转幅度越大,姿态角减小也越快,能够在更短的时间内达到弹道拉平状态。

3) 尾部撞击空泡壁面后,模型水平方向速度分量逐渐增加而竖直方向速度分量迅速减小。此外,入水角越小竖直方向速度分量衰减越快。

参考文献:

[1] 徐杏钦. 鱼雷入水弹道研究[J]. 鱼雷技术, 2004, 12(4): 29-31
XU Xingqin. Investigation of water entry trajectory of torpedo[J]. Torpedo Technology, 2004, 12(4): 29-31 (in Chinese)

- [2] 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
HOU Yu, HUANG Zhengui, GUO Zeqing, et al. Experimental investigation on shallow-angle oblique water-entry of a high-speed supercavitating projectile[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(2): 332-341 (in Chinese)
- [3] 黄海龙, 王聪, 余德磊, 等. 高速射弹并联入水过程空泡演化特性试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(12): 15-20
HUANG Hailong, WANG Cong, YU Delei, et al. Experimental study on cavitation evolution of high-speed projectile water entry in parallel[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(12): 15-20 (in Chinese)
- [4] 王树义, 王志东, 凌宏杰. 半潜式平台立柱入水砰击特性数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(3): 623-627
WANG Shuyi, WANG Zhidong, LING Hongjie, et al. Slamming characteristics on column of semi-submersible platform[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(3): 623-627 (in Chinese)
- [5] MAY A. Vertical entry of missiles into water[J]. Journal of Applied Physics, 1952, 23(12): 1362-1372
- [6] MAY A. Water entry and the cavity-running behavior of missiles[R]. SEAHAC/TR 75-2, 1975
- [7] WAUGH J G, STUBSTAD G W. Hydroballistics modeling[R]. NUCTP 447, 1975
- [8] 陈国明, 刘安, 胡俊华, 等. 航行器斜入水跳弹现象研究[J]. 船舶力学, 2020, 24(5): 611-617
CHEN Guoming, LIU An, HU Junhua, et al. Research on ricochet phenomenon of a vehicle making an oblique water-entry[J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(5): 611-617 (in Chinese)
- [9] XIA W, WANG C, WEI Y J, et al. Experimental study on water entry of inclined circular cylinders with horizontal velocities [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2019, 118: 37-49
- [10] EROSHIN V A. Experimental investigation of an elastic cylinder entering water at high velocity[J]. Fluid Dynamics, 1992, 27(5): 617-625
- [11] MIRZAEI M, TAGHVAEI H, GOLNESHAN A A. Improvement of cavity shape modeling in water-entry of circular cylinders by considering the cavity memory effect[J]. Applied Ocean Research, 2020, 97: 102073
- [12] MIRZAEI M, TAGHVAEI H, ALISHAHI M M. Mathematical modeling of the oblique water-entry of cylindrical projectiles[J]. Ocean Engineering, 2020(205): 107257
- [13] 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 Heng, ZHANG Aman, GONG Xiaochao, 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)
- [14] 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
- [15] 罗驭川, 黄振贵, 高建国, 等. 截锥体头型弹丸低速斜入水实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(11): 80-87
LUO Yuchuan, HUANG Zhengui, GAO Jianguo, et al. Experiment research of low-speed oblique water-entry of truncated cone-shaped projectile[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(11): 80-87 (in Chinese)
- [16] 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 Yun, YUAN Xulong, LYU Ce. Experimental research on curved trajectory of high-speed water-entry missile[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(12): 1998-2002 (in Chinese)

Experimental study on water-entry cavity and trajectory of vehicle with asymmetric nose shape

HUA Yang^{1,2}, SHI Yao^{1,2}, PAN Guang^{1,2}, HUANG Qiaogao^{1,2}

(1.School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2.Key Laboratory of Unmanned Underwater Vehicle Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Different nose shape can cause a significant influence on the water entry trajectory and cavity. In order to study the evolution characteristics of cavity and trajectory of asymmetric nose in the process of water entry, based on the high-speed photography technology, the low-speed water entry comparative experiments were carried out for three different cut-angle nose types of 35° , 40° and 45° under different water entry angles. Through digital image processing technology, the contour of the water entry cavity and motion attitude information of the vehicle at different times are extracted, and the law of influence of the cut angle and entry angle on the cavity and trajectory is obtained. The experimental results show that: the cut angle side of the asymmetric nose can effectively promote the expansion of the cavity, thus forming the asymmetric water entry cavity; the expansion scale of the cavity is positively related to the initial horizontal expansion speed of the cavity and the area of the section of the head; the water entry trajectory of the asymmetric head will deflect to the cut angle side; the smaller the water entry angle is, the shorter the trajectory leveling time is, and the deeper the leveling depth is. However, the change of attitude angle is almost independent of the entry angle.

Keywords: fluid mechanics; asymmetric nose shape; vehicle; water-entry; cavity; experimental study

引用格式: 华扬, 施瑶, 潘光, 等. 非对称头型航行器入水空泡形态与弹道特性的实验研究[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(6): 1249-1258

HUA Yang, SHI Yao, PAN Guang, et al. Experimental study on water-entry cavity and trajectory of vehicle with asymmetric nose shape[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(6): 1249-1258 (in Chinese)