

# 回转体倾斜入水空泡试验及六自由度数值计算研究

侯 昭<sup>1</sup>, 孙铁志<sup>1</sup>, 张桂勇<sup>1,2,3</sup>, 宗 智<sup>1,2,3</sup>

- (1. 大连理工大学船舶工程学院, 辽宁省深海浮动结构工程实验室, 大连 116024;
2. 大连理工大学工业装备与结构分析国家重点实验室, 大连 116024;
3. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

**摘 要:** 为研究回转体倾斜入水空泡及参数变化, 基于低速入水试验装置和 CFD 软件对该问题进行了试验和数值仿真研究。通过试验对回转体倾斜入水的空泡演变进行研究, 得到了不同时刻空泡形态图。数值计算选用基于 N-S 方程的雷诺平均 (RANS) 方法和基于  $k-\omega$  的 SST 二方程湍流模型, 建立了六自由度数值仿真方法。结果表明: 数值计算得到的空泡形态与试验结果一致性较好, 依次经历了撞击水面、空泡形成、颈缩、空泡断裂、空泡闭合、表面紊乱和空泡溃灭的过程。进一步分析发现速度、加速度和压力均在入水瞬间和空泡断裂时刻发生波动; 偏转角度在回转体尾部刺穿空泡后增幅明显; 随着入水角度增加, 入水瞬间速度衰减加快、压力峰值增加, 峰值出现越早, 空泡闭合越难。

**关键词:** 倾斜入水; 数值计算; 六自由度; 弹道

中图分类号: O352

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2017) 04-0038-08

## Experimental Investigation and 6-DOF Simulation of Oblique Water-entry Cavity of Revolution Body

HOU Zhao<sup>1</sup>, SUN Tie-zhi<sup>1</sup>, ZHANG Gui-yong<sup>1,2,3</sup>, ZONG Zhi<sup>1,2,3</sup>

- (1. Liaoning Engineering Laboratory for Deep-Sea Floating Structures, School of Naval Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to investigate the problem of oblique water entry cavity and its related parameters, both experiment and numerical simulation of oblique water-entry process have been carried out. In the experiment, the cavity evolution of oblique water entry was studied and the cavity morphology at different times was obtained. The numerical model was constructed using the RANS method and SST two-equation turbulence model based on  $k-\omega$  model, which can effectively simulate the 6-DOF movement of the revolution body. The results show that the cavity evolution obtained by numerical simulation agrees well with the experimental results, which mainly includes

收稿日期: 2017-09-12; 修订日期: 2017-10-28

基金项目: 国家自然科学基金 (51579042, 51639003, 51709042); 青年千人项目 (D1007001); 中央高校基本科研业务费专项资金 (DUT16ZD218, DUT17ZD311, DUT16RC(3)085)

作者简介: 侯昭 (1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为回转体入水流体动力特性研究。E-mail: 619256848@qq.com

通信作者: 张桂勇 (1978-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为无网格方法、船舶与海洋工程流固耦合分析及极地船舶等高新技术船舶开发技术。E-mail: gyzhang@dlut.edu.cn

the stages of impacting water surface, forming cavity, appearing pinch off phenomenon, cavity cracking, cavity closure, coming out surface disordered and cavity collapse. The change of water-entry parameters has been further analyzed based on the numerical simulation. It was found that the velocity, acceleration and pressure all change abruptly when the revolution body impacts water surface and the cavity cracks. The body's deflection angle shows an increasing trend, which becomes more significant after the tail of the revolution pierces the cavity. With the increase of incident angle, the velocity of the revolution body decreases rapidly and the peak pressure increases greatly when the revolution body impacts water surface. Besides, the peak pressure appears earlier and the cavity is more difficult to be closed.

**Key words:** Oblique water entry; Numerical simulation; Six degrees of freedom; Ballistic trajectory

## 0 引言

回转体倾斜入水不可避免地要经历撞击水面、空泡形成、颈缩、空泡断裂、空泡闭合、表面紊乱和空泡溃灭的过程。入水瞬间产生的冲击载荷可能对回转体结构造成破坏<sup>[1]</sup>；水下航行过程中产生的空泡影响其在水中的航行姿态及弹道稳定性<sup>[2-3]</sup>，甚至可能发生沉底、弹跳等问题。因此，研究入水空泡问题能够对提高回转体航行性能和结构稳定提供重要参考。

对入水问题的试验研究始于 19 世纪末，摄影技术的高速发展使得空泡从形成到溃灭过程得以被记录研究。Worthington 等<sup>[4]</sup>利用高速摄影技术，首次记录了刚性球垂直入水空泡演变过程。随后，Watanabe<sup>[5]</sup>在前人的基础上进行了不同头型结构低速入水试验，研究了瞬时冲击特性、最大阻力与入水速度的关系。针对不同头部形状回转体在不同角度下入水的工况，Abelson<sup>[6]</sup>在 1970 年对其所形成的空泡壁面内压力进行研究分析。May<sup>[7-8]</sup>对弹体垂直以及倾斜入水时空泡演变过程进行了研究，同时分析了弹体及流体的受力情况。何春涛等<sup>[9]</sup>进行了不同速度、角度的单圆柱体以及多圆柱体串行、并行入水空泡试验。此外，国内诸多学者<sup>[10-13]</sup>还针对不同物体入水空泡演变过程开展了大量研究。随着计算机的发展和入水空泡理论的成熟，数值计算逐渐成为入水空泡问题的重要研究方法。石汉成等<sup>[14]</sup>通过 MSC Dytran 研究了头部形状对水雷入水载荷及水下弹道的影响。He 等<sup>[2]</sup>对垂直入水空泡内部压强分布进行了数值仿真。张国军等<sup>[15]</sup>基于 VOF 模型对导弹低速入水进行仿真模拟。程文鑫等<sup>[16]</sup>对鱼雷在小入水角条件下的入水空泡形成过程进行了计算。朱珠

等<sup>[17]</sup>仿真分析了入水攻角和速度对入水弹道的影响规律。

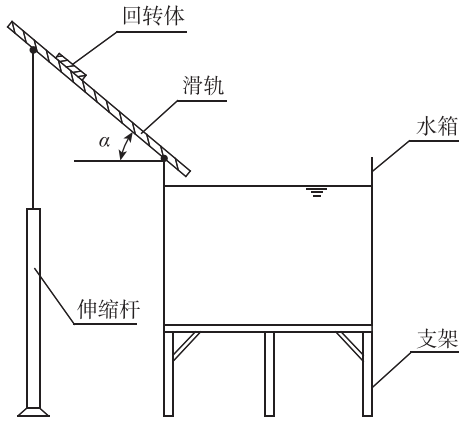
本文对低速倾斜入水空泡问题进行了试验，同时利用 CFD 软件对试验过程进行了数值仿真。入水过程涉及多相流的非线性问题，同时属于流固耦合范畴，数值计算过程采用 RANS 方法和基于  $k-\omega$  的 SST 二方程湍流模型，利用 VOF (Volume of Fluid) 模型、欧拉多相模型来描述流体体积及模拟空泡形成至溃灭的过程，采用 VOF 波捕捉自由液面并利用六自由度体定义回转体，通过重叠网格技术模拟回转体入水过程，从而建立了回转体倾斜入水空泡问题的数值仿真方法，并与试验结果进行对比验证。在此基础上进一步分析了倾斜入水过程中弹道、流体动力以及入水空泡演变特性。

## 1 试验系统和数值计算模型

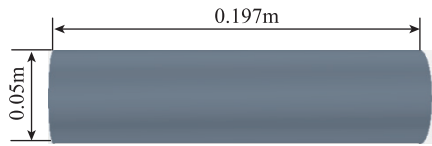
### 1.1 试验系统

试验系统设计如图 1 (a) 所示，系统主要由底部支架、试验水箱、滑轨机构、灯光系统、高速摄像机和计算机组成。试验水箱由钢化玻璃板制成，尺寸为  $1.5\text{m} \times 0.8\text{m} \times 1.2\text{m}$ ，箱内水深为  $1\text{m}$ ，试验选用  $20^\circ\text{C}$  的自来水；支架置于水箱底部，底部装有滚轮，达到支撑固定实验水箱及方便移动的目的；滑轨机构是实现回转体以一定速度及角度入射的基础，滑轨一端固定在水槽上，另一端固定在可调节支架上，通过调整回转体在滑轨上的位置来改变入水速度，调整伸缩杆高度可以改变入水角度；入水空泡演变过程采用 Photron 高速工业摄像机记录，将其放置在试验水箱正前方，联合使用计算机和高速摄像机专用软件 PCC 进行数据采集和处理；在高速摄像机两边

分别设置两个 Starison CE-1500Ws 透射式聚光灯，构成灯光系统，保证图片采集质量。用于试验的回转体模型为铝制实心圆柱体，密度为  $2740\text{kg/m}^3$ ，长度为  $0.197\text{m}$ ，质量为  $1.06\text{kg}$ ，直径为  $0.05\text{m}$ 。



(a) 试验装置示意图



(b) 试验回转体模型

图1 试验装置及回转体模型

Fig. 1 Schematic of the water-entry experiment and revolution model

## 1.2 数值计算模型

### 1.2.1 基本控制方程

本文计算所涉及的控制方程主要包括质量守恒方程和动量守恒方程。

质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

其中， $\rho$  为流体密度，本文涉及气、液两相，故密度根据各相所占体积分数来确定； $t$  为时间； $u_i$  为沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的速度分量； $x_i$  为在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的位置。

动量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g \quad (2)$$

其中， $\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  为黏性剪切应力，

$\mu$  为动力黏性系数， $P$  为压力。

### 1.2.2 湍流模型

RANS 方程中由于雷诺应力的出现，增加了未知量数量，因此需要采用特定的湍流模型来封

闭方程。本文选用涡黏模型中基于  $k-\omega$  的 SST 二方程湍流模型：

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \int_V \rho k dV + \int_A \rho k (v - v_g) dA = \int_A (\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k \cdot dA + \int_V [\gamma_{\text{eff}} G_k - \gamma' \rho \beta^* f_{\beta^*} (\omega k - \omega_0 k_0) + S_k] dV \\ \frac{d}{dt} \int_V \rho \omega dV + \int_A \rho \omega (v - v_g) dA = \int_A (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega \cdot dA + \int_V [G_\omega - \rho \beta (\omega^2 - \omega_0^2) + D_\omega + S_\omega] dV \end{cases} \quad (3)$$

其中， $k$  为湍动能， $\omega$  为湍流耗散率， $S_k$  和  $S_\omega$  是用户指定的源项， $k_0$  和  $\omega_0$  是用来抵消湍流衰减的环境湍流值， $\mu$  为动力黏性系数； $\gamma_{\text{eff}}$  是有效间隔，定义  $\gamma' = \min [\max (\gamma_{\text{eff}}, 0.1), 1]$ 。

二方程湍流模型中  $G_\omega$  根据标准  $k-\omega$  模型估算得到：

$$G_\omega = \rho \gamma \left[ \left( S^2 - \frac{2}{3} (\nabla \cdot v)^2 \right) - \frac{2}{3} \omega \nabla \cdot v \right] \quad (4)$$

其中， $\gamma$  为模型的混合系数， $S$  为平均应变张量的模。

$D_\omega$  为交叉导数项，定义为：

$$D_\omega = 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega \quad (5)$$

湍流黏度  $\mu_t$  定义为：

$$\begin{cases} \mu_t = \rho k T \\ T = \min \left( \frac{\alpha^*}{\omega}, \frac{\alpha_1}{SF_2} \right) \end{cases} \quad (6)$$

其中， $T$  是湍流时间尺度，在 Durbin 约束下计算得到；系数  $\alpha^* = 1$ ；系数  $\alpha_1 = 0.31$ ；函数  $F_2 = \tanh \left[ \max \left( 2 \frac{\sqrt{k}}{0.99 \omega y}, \frac{500 \mu}{y^2 \omega} \right) \right]^2$ ； $y$  为到近壁面的距离。

模型系数  $\phi$  由混合函数  $F_1$  计算得到：

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 \quad (7)$$

其中，系数  $\phi_1$  包括：

$$\begin{cases} \beta_1 = 0.0750, \sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{\omega 1} = 0.5 \\ \kappa = 0.41, \gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \sigma_{\omega 1} \frac{\kappa^2}{\sqrt{\beta^*}} \end{cases} ;$$

系数  $\phi_2$  包括：

$$\begin{cases} \beta_2 = 0.0828, \sigma_{k2} = 1.0, \sigma_{\omega 2} = 0.856 \\ \kappa = 0.41, \gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \sigma_{\omega 2} \frac{\kappa^2}{\sqrt{\beta^*}} \end{cases} ;$$

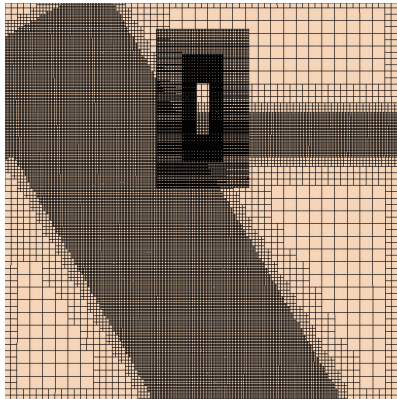
混合函数  $F_1$  定义为:

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{0.99\omega y}, \frac{500\mu}{y^2\omega} \right), \frac{2k}{y^2 CD_{kw}} \right] \right\}^4;$$

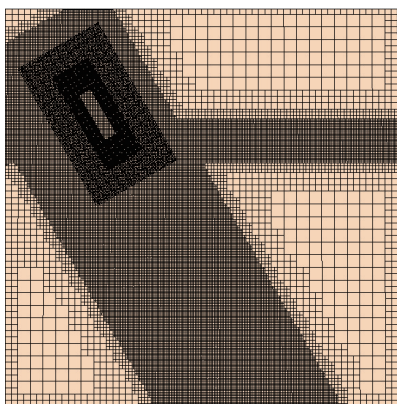
$$\beta^* = 0.09; CD_{kw} \text{ 与交叉扩散项有关, } CD_{kw} = \max \left( \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega, 10^{-20} \right).$$

### 1.2.3 计算模型及设置

本文采用的物理模型和计算水域均与试验相同,以便进行对比验证。网格划分是整个建模仿真的基础,网格质量优劣直接关系计算结果的准确性。本文采用网格生成质量比较好的切割体网格生成器,加以表面重构提高网格质量。在壁面边界加设棱柱层网格生成器,设置棱柱层厚度为0.5mm,棱柱层数为5层。为保证仿真模拟的质量,在回转体运动弹道、水面以及回转体1.5倍半径范围内进行网格加密。网格划分时保持重叠区域垂直,网格生成后再对重叠区域旋转平移至指定工况。本文计算的网格总数为3609899,网格划分如图2所示。



(a) 重叠区域转换前



(b) 重叠区域转换后

图2 网格划分

Fig. 2 Mesh generation

针对低速回转体入水问题,采用重叠网格技术<sup>[18]</sup>实现对物体运动的模拟。重叠网格就是嵌套于流体域网格中、随物体运动的网格,具有网格易生成、质量好的特点。重叠网格通过搜索指定区域,进行网格划分;在物体运动过程中的每个时间步都需要将重叠区域从流体域内逐步剔除重新定位,以此来模拟入水过程;重叠网格与流体网格之间通过数据的插值进行信息传递。重叠网格局部如图3所示。

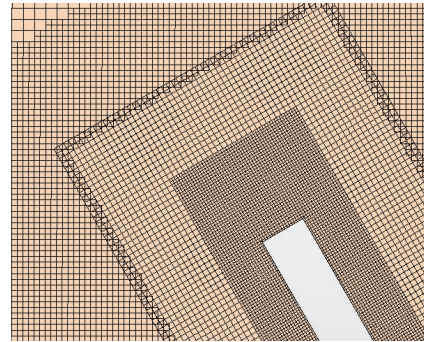


图3 重叠网格

Fig. 3 Overlapping grid

由于入水空泡问题涉及多相流,本文采用基于欧拉-欧拉型方法的VOF模型进行计算。将多相流中的流体视为均匀物质,通过各相流体所占体积分数来描述不同流体。体积分数总和为1,体积分数为1时代表液相,为0时代表气相,处于0到1之间表示气液的混合物。依此来表征各相流体体积,模拟低速回转体入水过程中的空泡演变。

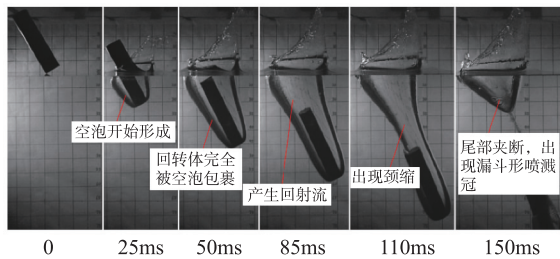
本文数值计算过程采用VOF波定义的平波来捕捉自由液面,模拟气液交界面。数值计算边界条件为:入口设置为速度入口;出口为压力出口;根据厉尚书<sup>[19]</sup>研究,为避免入水过程压力壁面条件发生反射,将壁面设置为速度入口;重叠区域设定为重叠网格边界,回转体表面设定为壁面条件。

## 2 结果与分析

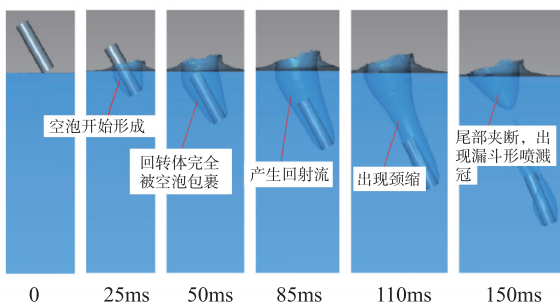
试验中回转体以4.85m/s初速度、60°入射角(与水平面的夹角)的初始条件入水,得到的空泡演变过程如图4(a)所示。从图4中可以看出,入水空泡的演变分为以下几个阶段:撞击水面、空泡形成、颈缩、空泡断裂空泡闭合、空泡表面紊乱和空泡溃灭。随着回转体入水,其周围开始形成空泡,如25ms时的状态;入水50ms,回转

体完全被空泡包裹，空泡随回转体运动，逐渐扩展；85ms时，在尾部形成回射流；110ms时，伴随入水深度的增加，流场的压力及空泡的表面张力使空泡直径减小，导致出现颈缩现象；入水150ms时，空泡完全闭合，尾部空泡脱落并在液体表面处形成漏斗形喷溅冠，闭合空泡受惯性影响跟随回转体继续运动，受流场冲击作用，空泡表面逐渐紊乱；180ms时，空泡溃灭为气泡沿回转体上浮；在整个入水过程中，液体表面都存在喷溅现象。

数值计算过程首先采用与上述试验相同的情况，表征空泡外形的含气率的量值设定为0.5，从而得到图4(b)中空泡演变过程，并与不同时刻回转体入水空泡形态的试验结果进行对比。从图4中可以看出，数值计算得到的空泡形态演变与试验结果一致性较好，包括入水空泡的形成、颈缩现象、空泡闭合、空泡脱落及溃灭、水面形成喷溅，从而验证了所建立的数值计算方法。



(a) 试验空泡演变过程



(b) 数值计算空泡演变过程

图4 试验与数值计算入水空泡演变对比

Fig. 4 Comparison of cavity evolution between the experimental results and numerical predictions

图5给出了入水过程典型时刻回转体对称面压力分布云图。从图5中可以看出：在入水瞬间，自由液面对回转体头部产生较大压力。空泡闭合前，近水面处压力较大，因为此时空泡颈缩加剧并产生回射流，导致大量气体向近水面移动，故压力增加；另外，受空泡形态影响回转体迎流面的低

压区明显比背流面大。在0.15s时空泡闭合，近水面高压区随着气流的流出而消失；回转体迎流面低压区与背流面尺寸差别缩小。空泡闭合后，近水面与回转体之间形成长条状低压区，这由少量气泡脱落引起；同时，外部水压大于空泡内部压力并挤压空泡，导致迎流面低压区与背流面大小基本相同，空泡内部压力相较空泡闭合前增加。

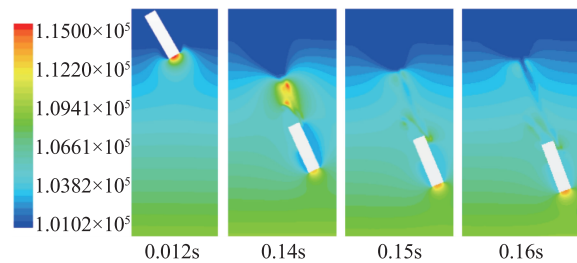


图5 入水过程典型时刻压力分布云图

Fig. 5 Pressure diagram at typical time of water-entry process

为进一步探究倾斜入水空泡演变特征和机理，对回转体倾斜入水过程中速度、加速度、弹道以及受力情况进行深入分析。图6给出了入水过程中速度、加速度变化曲线。从图6中可以看出：从接触水面至入水0.01s过程，速度下降比较大，加速度迅速降低至0以下，这是入水瞬间产生巨大冲击而后冲击减缓引起的，这个过程中回转体受到阻力也在瞬间增加而后减小，所以在初始时刻速度、加速度变化剧烈；回转体入水后的0.01s~0.11s期间，受重力、惯性力和阻力联合作用，速度基本上呈直线下降、加速度缓慢减小；0.11s~0.13s期间，加速度减小趋势略增，速度变化与之前相差不大；0.13s~0.15s期间，加速度明显减小，速度基本不变；0.15s~0.26s时间内，速度缓慢减小，加速度缓慢变化。

回转体入水过程中速度、加速度变化与空泡形态密切相关。由图7可知，0.11s~0.13s时间内，空泡颈缩加剧，弹体尾部刺穿空泡，此时空泡开始闭合，回转体受阻力略增，加速度有所减小但幅度不大，因此速度减小趋势基本不变；0.13s~0.15s期间，头部空泡大量向尾部移动，回转体受阻力大幅增加，造成加速度明显减小且趋于0，速度基本保持不变，在0.15s时发生空泡断裂，阻力瞬间减小，加速度有增加趋势；0.15s~0.26s期间，空泡跟随回转体运动，有少量气泡脱落，阻力变化不大，因而加速度缓慢变化，速度缓慢减小。

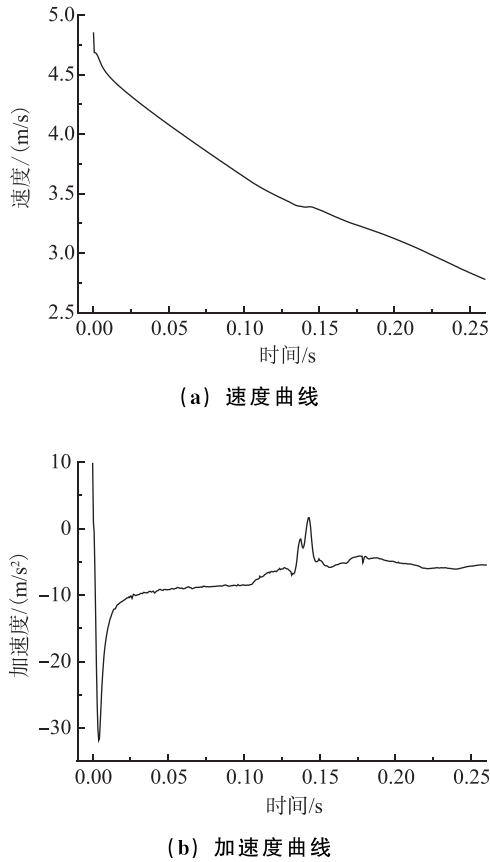


图 6 速度、加速度曲线

Fig. 6 Time histories of velocity and acceleration

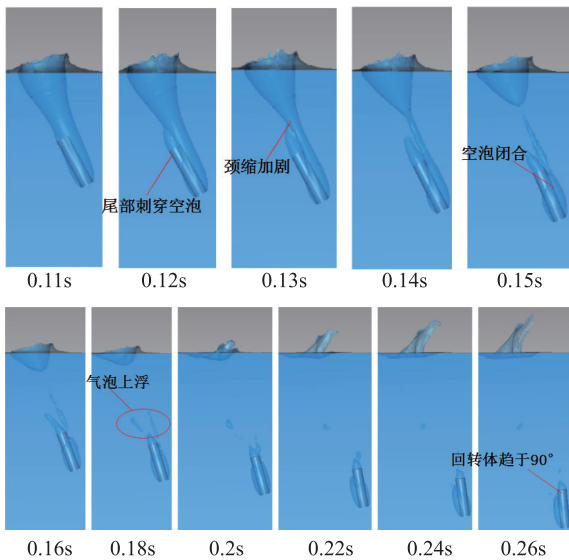


图 7 0.11s~0.26s 时间内空泡形态演变

Fig. 7 The cavity evolution from 0.11s to 0.26s

为分析入水后回转体运动轨迹的变化，对其运动的偏转角度（与水平面的夹角）进行了讨论，偏转角度变化如图 8 所示。从回转体入水直至 0.11s 的过程中偏转角缓慢增大，0.11s 之后偏转角度增幅明显，逐渐趋近于 90°。这是由于入水初

期速度比较大，回转体运动受惯性影响大且空泡正处于发展期，从而保持原有运动轨迹，偏转角变化较小；由图 7 可以看出，从 0.11s 开始，回转体刺穿空泡，颈缩加剧，头部空泡逐渐向尾部移动直至断裂，造成阻力增加，速度逐渐减小，惯性的影响逐渐减弱，回转体受重力影响大，因而偏转角度增幅变大，逐渐趋于与水平面垂直状态。

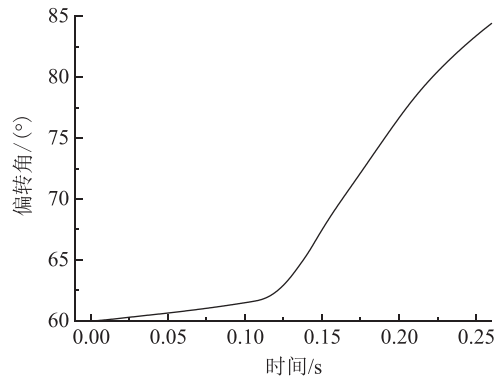


图 8 偏转角随时间变化

Fig. 8 Time history of deflection angle

图 9 给出了回转体入水过程中头部压力变化。可以看出回转体撞击水面时压力急剧增加后又迅速减小，可见入水瞬间产生较大的冲击载荷；随着入水空泡的形成压力有所减小；在 0.12s ~ 0.15s 期间发生较大起伏，主要原因是此时头部空泡向尾部运动并发生脱落，从而影响回转体头部与水作用的受力情况；0.15s 后空泡随物体运动，中心点压力受水深的增加而小幅度增大。

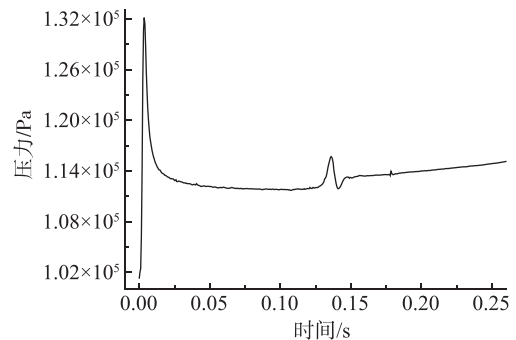


图 9 头部中心点压力曲线

Fig. 9 The pressure at the center of the head

为研究不同入水角度对回转体弹道特性的影响。基于建立的数值方法，同时开展了 45° 和 75° 倾斜入水工况的计算，其中不同角度入水的初速度相同。图 10 对比了不同入水角度下回转体头部中心点压力变化。从图 10 中可以看出：不同入水角度下，回转体头部中心点压力变化曲线趋势基

本一致；随着入水角度的增加，入水瞬间回转体头部所受冲击压力增大；入水角度越大，压力峰值和波动出现时间越早，这是因为大角度入水时头部与自由液面接触面大，故压力增加迅速；在0.13s附近，由于大角度入水过程空泡发生断裂，颈缩时间较早，导致出现波动压力峰值时刻靠前。

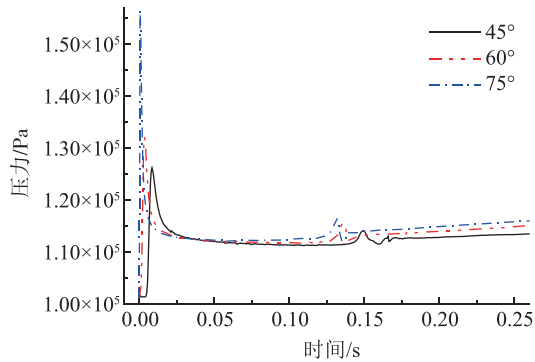


图 10 不同入水角压力变化曲线

Fig. 10 Time histories of pressure at different angles

图 11 对比了不同入水角度下速度变化。从图 11 中可以得出：回转体在不同入水角度下，速度变化曲线趋势基本一致；入水角度越大，入水瞬间回转体所受冲击压力越大，导致入水速度衰减加快；随着入水角度的增加，在速度曲线中变化缓慢的区域（图中 a 区域）持续时间更长，即空泡从颈缩加剧到闭合的过程持续时间更长。

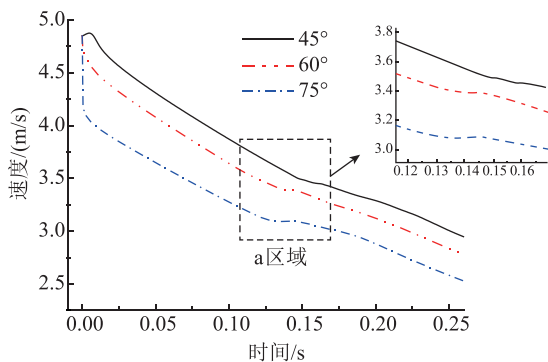


图 11 不同入水角速度变化曲线

Fig. 11 Time histories of velocity at different angles

### 3 结论

本文对回转体倾斜入水空泡问题进行了试验和数值计算研究，对入水空泡演变、弹道变化以及受力情况进行了深入探讨，得到的主要结论如下：

1) 回转体倾斜入水依次经过了：撞击水面、空泡开始形成、颈缩、空泡完全闭合、空泡表面

紊乱、空泡溃灭等过程。

2) 入水瞬间压力、速度、加速度受冲击载荷影响产生较大波动。随后，在空泡敞开阶段，受压差影响外部空气进入空泡，空泡外壁受水压影响逐渐闭合，闭合空泡受高速气流进入的影响导致内部压力降低。由于闭合空泡内气压的突然下降，导致回转体的速度、加速度和压力出现波动。回转体偏转角则从尾部刺穿空泡后开始增幅变大。

3) 不同入水角度对回转体倾斜入水的影响主要体现在：随着入水角度的增加，回转体入水瞬间速度衰减加剧，压力峰值增大，空泡从颈缩加剧到闭合的过程持续时间增长，压力峰值和波动出现的时间提前。

### 参考文献

- [1] 郑金伟,宗智. 三维刚体椭圆头结构高速倾斜入水冲击模拟 [J]. 船海工程, 2012, 41 (3): 7-9.
- [2] He C T, Wang C, Wei Y J, et al. Numerical simulation of pressure distribution in vertical water-entry cavity [J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15 (9): 960-968.
- [3] 王聪,何春涛,权晓波,魏英杰. 空气压强对垂直入水空泡影响的数值研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44 (5): 14-19.
- [4] Worthington A M, Irwin K G. A study of splashes [J]. Science, 1909, 29 (742): 464-465.
- [5] Watanabe S. Resistance of impact on water surface [J]. Scientific Papers of the Institute of Physical and Chemical Research of Japan, 1934, 23 (484): 202-208.
- [6] Abelson H I. Pressure measurements in the water-entry cavity [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1970, 44 (1): 129-144.
- [7] May A. Review of water-entry theory and data [J]. Journal of Hydronautics, 1970, 4 (4): 140-142.
- [8] May A. Water entry and the cavity-running behavior of missiles [R]. Nasa Sti/recon Technical Report N, 1975.
- [9] 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): 281-228.
- [10] 顾建农,张志宏,王冲,等. 旋转弹头水平入水空泡及弹道的试验研究 [J]. 兵工学报, 2012, 33 (5): 540-544.
- [11] 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.

- [12] 路中磊,魏英杰,王聪,等. 基于高速摄像试验的开放腔体圆柱壳入水空泡流动研究 [J]. 物理学报, 2016, 65 (1): 301-315.
- [13] 蒋运华,徐胜利,周杰. 圆盘空化器航行体入水空泡试验研究 [J]. 工程力学, 2017, 34 (3): 241-246.
- [14] 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.
- [15] 张国军,闫云聚. 基于VOF模型的导弹低速入水数值模拟方法 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2013, 14 (6): 23-26.
- [16] 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.
- [17] 朱珠,袁绪龙,刘维. 柱体大攻角入水弹道建模与仿真 [J]. 火力与指挥控制, 2015, 40 (2): 13-18.
- [18] 徐伟光,赵发明,何术龙. 基于重叠网格的船舶运动计算方法研究 [J]. 船舶力学, 2016, 20 (7): 824-832.
- [19] 厉尚书. 空投鱼雷入水冲击数值模拟的研究 [D]. 太原: 中北大学, 2015.