

# 破碎浮冰环境下结构物倾斜入水的空泡演化特性

\*

杨帅<sup>1</sup>, 鹿麟<sup>1,2</sup>, 胡彦晓<sup>3</sup>, 杨哲<sup>1</sup>, 陈凯敏<sup>1</sup>

- (1. 中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051;  
2. 重庆长安望江工业(集团)有限责任公司, 重庆 401120;  
3. 内蒙航天动力机械测试所, 内蒙古 呼和浩特 010076)

**摘要:** 为探究破碎浮冰覆盖密度对结构物入水空泡演化的影响, 利用高速摄影技术, 开展不同破碎浮冰覆盖密度下结构物倾斜入水实验。此外, 通过对比不同碎冰覆盖密度工况下结构物倾斜入水过程, 获得了碎冰覆盖密度对结构物倾斜入水空泡演化特性的影响规律。结果表明: 与无冰环境相比, 当空泡扩张时, 破碎浮冰通过阻碍液面流体的向外扩张, 致使空泡的直径减小; 而空泡闭合时, 碎冰亦会阻碍液面流体的向内收缩, 延长空泡扩张时间, 此时空泡内空气总量增加, 空泡内外压差减小, 最终导致空泡的闭合时间延迟。随着碎冰覆盖密度的逐渐增加, 其对液面流体向内收缩的阻碍作用逐渐增强, 进一步延缓了空泡的闭合时间, 空泡的长度和最大直径也相应增大。碎冰覆盖密度较小的工况在空泡溃灭时会出现指向空泡内部的射流。此外, 碎冰覆盖密度较大的工况下, 流体的无规则冲击使得空泡壁出现褶皱。随着结构物入水深度的增加, 空泡在环境压力作用下会出现深颈缩现象。随着碎冰覆盖密度的逐渐增加, 结构物的水下运动速度相较于无冰环境呈现出更快的衰减趋势。

**关键词:** 碎冰环境; 倾斜入水; 入水实验; 空泡演化; 结构物

中图分类号: TJ012.3

国标学科代码: 1302567

文献标识码: A

## Experimental study on cavity evolutionary characteristics of oblique water-entry structure in the crushed ice floe environment

YANG Shuai<sup>1</sup>, Lu Lin<sup>1,2</sup>, HU Yanxiao<sup>3</sup>, YANG Zhe<sup>1</sup>, CHEN Kaimin<sup>1</sup>

- (1. School of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;  
2. Chongqing Changan Wangjiang Industry (Group) Co., LTD, Chongqing 401120, China  
3. Inner Mongolia Aerospace Power Machinery Testing Institute, Hohhot 010076, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** To investigate the influence of the density of crushed ice region on the cavity evolution of the structure, the oblique water-entry experiment of the structure was conducted by high-speed photography technology under different crushed ice cover densities. Moreover, by compared the water-entry process of oblique structures in varying densities of crushed ice cover, the influence of crushed ice cover densities on the cavity evolution for the oblique water-entry process of the structure was obtained. Results indicate that during the cavity expansion, the presence of crushed ice reduces the cavity diameter by impeding the outward expansion of the fluid near the free surface, compare with the ice-free environment. When the cavity closes, crushed ice also impede the inward contraction of the free surface fluid, and prolong the time of the expansion of the cavity. The augmentation in

\*收稿日期: 2024-07-11; 修回日期: 2024-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(52201385); 山西省回国留学人员科研资助项目(2024-114);

第一作者: 杨帅(2000-), 男, 硕士研究生. E-mail: yangshuai@163.com;

通信作者: 鹿麟(1988-), 男, 博士, 副教授. E-mail: lulin2016@nuc.edu.com.

the total volume of air within the cavity results in a decrement of the pressure differential between the inside and outside of the cavity, ultimately **leads** to a retardation in the closure time of the cavity. As the coverage density of crushed ice gradually increases, the impedance exerted by the crushed ice on the inward contraction of fluid at the free surface progressively intensifies. This enhanced obstruction from the crushed ice further prolongs the closure time of the cavity, concurrently augments its length and maximum diameter. In conditions of lower crushed ice densities, jets point to the interior of the cavity when the cavity collapses. Besides, under conditions of higher crushed ice cover densities, the cavity wall is wrinkled by the irregular impact of the fluid. As the submerged depth of the structure increases, the cavity undergoes a deep necking phenomenon under the influence of ambient pressure. As the coverage density of crushed ice gradually increases, The velocity of the underwater motion of structures shows a trend of faster decay compared to ice-free environments.

**Keywords:** crushed ice floe environment; oblique water-entry; water-entry experiment; cavity evolution; structure

在北极的复杂环境中，全球气候变暖致使海面上存在大量破碎浮冰，破碎浮冰的存在会影响结构物的入水过程。首先，破碎浮冰会影响结构物入水时的能量传递，从而影响空泡演化过程；其次，结构物入水时可能会与液面破碎浮冰发生碰撞，影响结构物的运动稳定性。因此，开展不同碎冰环境下结构物入水的实验研究，为适用于北极破碎浮冰环境作战的武器装备提供一定的理论依据。

随着无冰环境下入水问题研究成果的不断积累，以及对极地海洋入水设备快速发展的需求，越来越多的学者针对冰环境下结构物入水及出水的问题开展研究。张润东<sup>[1]</sup>等基于任意拉格朗日-欧拉方法建立了碎冰环境下的航行体高速入水流固耦合计算模型，结果表明碎冰会影响航行体入水后得飞溅演化。张军<sup>[2]</sup>等利用欧拉-拉格朗日耦合方法对射弹进行流固耦合计算，发现了流体应力会影响结构物运动，不同冰体分布会造成弹体质心位移。闫雪璞<sup>[3]</sup>基于浮冰扰动下结构物入水流固耦合数值计算方法，发现单块浮冰的存在会破坏空泡的对称性。蔡晓伟<sup>[4]</sup>等基于 LS-DYNA 软件研究了细长体穿越冰-水混合物的出水流场，获得了接触与非接触两工况下流场的主要特征并验证了该方法的适用性。杨哲<sup>[5]</sup>等利用模拟仿真研究了不同冰孔孔径下圆柱体入水运动过程，结果表明冰孔通过改变自由液面的流动情况进而影响表面喷溅，并且会约束空泡扩张。张东晓<sup>[6]</sup>等通过开展冰孔约束条件下结构物倾斜入水实验并对比不同速度的空泡演化特性，结果表明空泡的长度和最大直径随着入水初速的提高而增大，且局部冲击溃灭宽度增加。鹿麟<sup>[7]</sup>等基于高速摄影技术开展冰孔约束条件下圆柱体倾斜入水，实验发现冰孔对空泡的扩张和闭合均有影响。Tang<sup>[8]</sup>等通过开展截锥形弹头以及平弹头穿过冰水混合物实验，结果表明两种工况下的空泡直径都会随着弹体的速度增加而增大，并且结构物在撞击冰粒后会发生偏转。Hu<sup>[9]</sup>等基于重叠网格技术研究了结构物穿过水下冰洞时的空泡动力学，结果表明结构物在穿过冰洞时其空泡先缩小后膨胀，冰洞的存在影响了结构物周围的速度。Wang<sup>[10]</sup>等基于有限体积法和重叠网格技术模拟圆柱低速垂直进入无冰和冰水混合物的过程，结果发现空泡表明未闭合，导致空泡内外压差发生变化。You<sup>[11]</sup>等通过数值仿真方法建立了碎冰分布场下高速航行体出水过程模型，通过对实验结果的对比得出了碎冰环境航行体出水过程的影响机理。Gao<sup>[12]</sup>等基于流体体积多相流模型和重叠网格技术，对结构物与浮冰之间不同间距进行数值模拟，研究表明浮冰通过影响自由液面流体进而影响空泡演化。张健宇<sup>[13]</sup>采用数值计算与试验相结合的方法，结果发现冰存在破坏了出水空泡的形态，改变了出水过程的载荷特性。张松<sup>[14]</sup>等结合重叠网格技术和接触耦合算法，研究表明碎冰的存在使流场得演化更加剧烈，改变了空泡的演化过程和溃灭形式。

目前，国内外学者对冰环境下的研究主要集中在结构物的垂直入水和出水，并且大多数研究采用简化后的浮冰场进行数值仿真分析。这些研究在一定程度上揭示了结构物与冰环境相互作用的基本规律。然而，针对结构物在复杂浮冰环境下入水行为的研究相对较少，尤其是考虑到实际情况中浮冰场往往具有高度的不规则性和动态变化性。因此，为弥补现有研究的不足，本文通过模拟实际复杂浮冰环境，开展不同破碎浮冰环境下结构物倾斜入水的实验研究。

# 1 实验设备

图1 实验系统示意图为破碎浮冰环境下结构物倾斜入水实验系统示意图，实验系统主要由发射系统、高速摄像机、水箱以及照明系统组成。水箱尺寸为  $6.7\text{m} \times 2.5\text{m} \times 2.0\text{m}$ ，为便于高速摄像机拍摄，水箱前后两侧均为钢化玻璃，水箱底部布置接弹板，实验前水箱内注水高度为  $1.3\text{m}$ 。发射系统主要由轻气炮发射装置、角度调节器、储气装置、高压氮气瓶组成与发射控制装置组成；发射装置由一根内径  $8\text{mm}$ ，长度约  $2.1\text{m}$  的钢制身管制成，通过改变储气装置的初始压力来获得不同的初始发射速度；发射控制装置由电磁击发装置与电磁气阀组成，一方面可记录结构物发射时的气压，另一方面负责结构物的击发和高速摄像机的时序控制。角度调节器固定在支撑架上，可通过液压装置使其绕轴，以达到调节发射角度的目的。水箱前侧布置一台平时拍摄的高速摄像机，其图像采集帧率为  $7200\text{s}^{-1}$ 。水箱的背面布置照明系统，在灯板与水箱中间设置柔光屏，用于提升拍摄画面质量。拍摄范围内布置有  $50\text{mm} \times 50\text{mm}$  坐标纸，用于实验测试结果的校准。

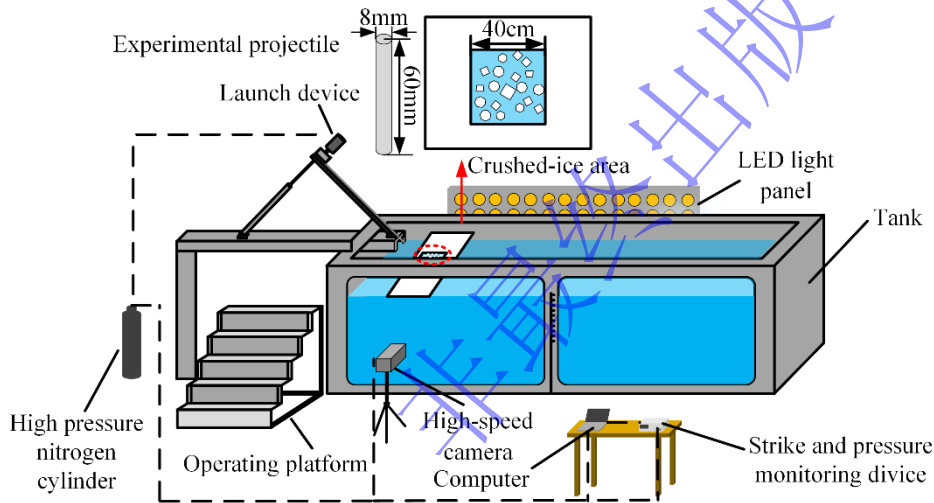


图1 实验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental system

实验所用结构物模型为平头圆柱体结构物，结构物全长  $L=60\text{mm}$ ，直径  $D=8\text{mm}$ ，材料为钢。为能够更好的探究浮冰对结构物入水运动过程及空泡演化的影响，选取聚丙烯板并且在其内部截去  $400\text{mm} \times 400\text{mm}$  的方孔用以放置浮冰，该聚丙烯板与水箱内部宽度相同以限制其滑移，从而减少浮冰移动所带来的实验误差。将纯净水注入不同大小的制冰模具中进行冷冻处理，制冰模具由不锈钢焊接而成，深度为  $20\text{mm}$ ，共三种水平尺寸，分别为  $510\text{mm} \times 100\text{mm}$ 、 $510\text{mm} \times 160\text{mm}$  以及  $510\text{mm} \times 230\text{mm}$ ，通过面积计算从而得到不同的碎冰覆盖密度工况。定义无量纲  $\delta = S/S_0 \times 100\%$ ，其中  $S$  为破碎浮冰覆盖面积， $S_0$  为方孔的面积，如图2 破碎浮冰工况示意图所示。利用上述实验装置开展  $\delta$  取值为  $0$ 、 $30\%$ 、 $50\%$ 、 $70\%$  下结构物倾斜入水实验。为确保实验结果的可靠性，获取有效的实验数据结果，对每个工况均进行至少  $3$  次实验。

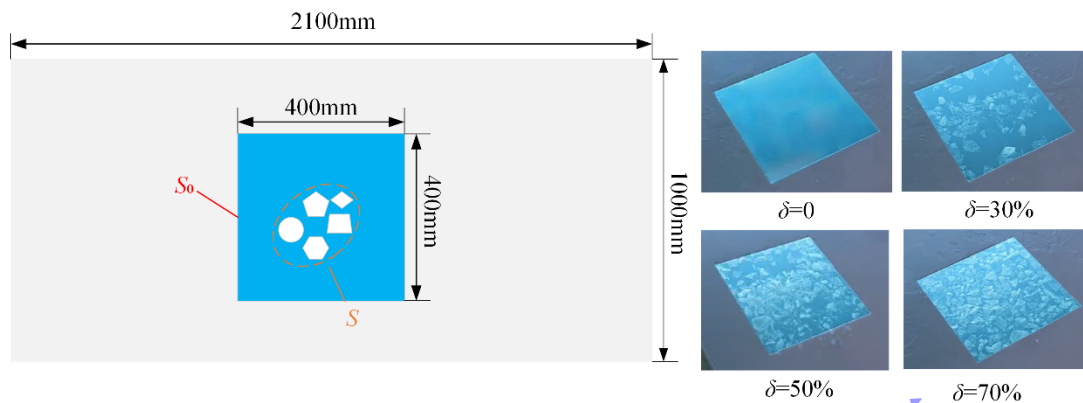


图 2 破碎浮冰工况示意图

Fig.2 Schematic diagram of different crushed ice conditions

## 2 碎冰环境下结构物入水空泡演化特性分析

图 3 实验工况示意图展示了实验工况的示意图，其中结构物以  $60\text{m/s}$  的初速入水，且入水角均为  $60^\circ$ 。此外，将结构物与水面接触的瞬间定义为  $t=0\text{ms}$  时刻。除此之外，为便于分析入水过程，以结构物轴线为分界线，轴线右侧为背水面，轴线左侧为迎水面。

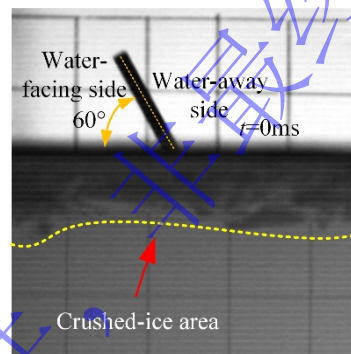


图 3 实验工况示意图

Fig.3 Schematic diagram of experimental conditions

不同工况下结构物入水空泡扩张过程如图 4 空泡扩张阶段空泡演化图所示。由图 4(a)可发现，当  $t=0.83\text{ms}$  时，四种工况下结构物入水时均出现了向右的入水喷溅， $\delta=0$  工况下背水面喷溅呈弯曲的短弧形与液面相接，并且喷溅相对集中；而  $\delta=50\%$ 、 $\delta=70\%$  工况下背水面喷溅呈无规则状且较为分散。究其原因，一方面是因为液面浮冰会阻碍液体的飞溅，导致破碎浮冰环境只有一小部分液体形成喷溅；另一方面，由于结构物入水产生的扰动，自由液面上的小块碎冰会有一部分向上运动，而另一部分则从浮冰体间的间隙中飞出，从而造成喷溅分散现象。当  $t=1.94\text{ms}$  时，背水面喷溅逐渐向上运动， $\delta=0$  工况形成了一条狭长的弧形喷溅，而其它三个工况则随着  $\delta$  值的增大，背水面喷溅愈加分散。这是因为随着  $\delta$  值的增大，自由液面处破碎浮冰数量增多，同时结构物入水冲击造成了更多的破碎浮冰向上运动，从而最终导致背水面喷溅越来越分散。

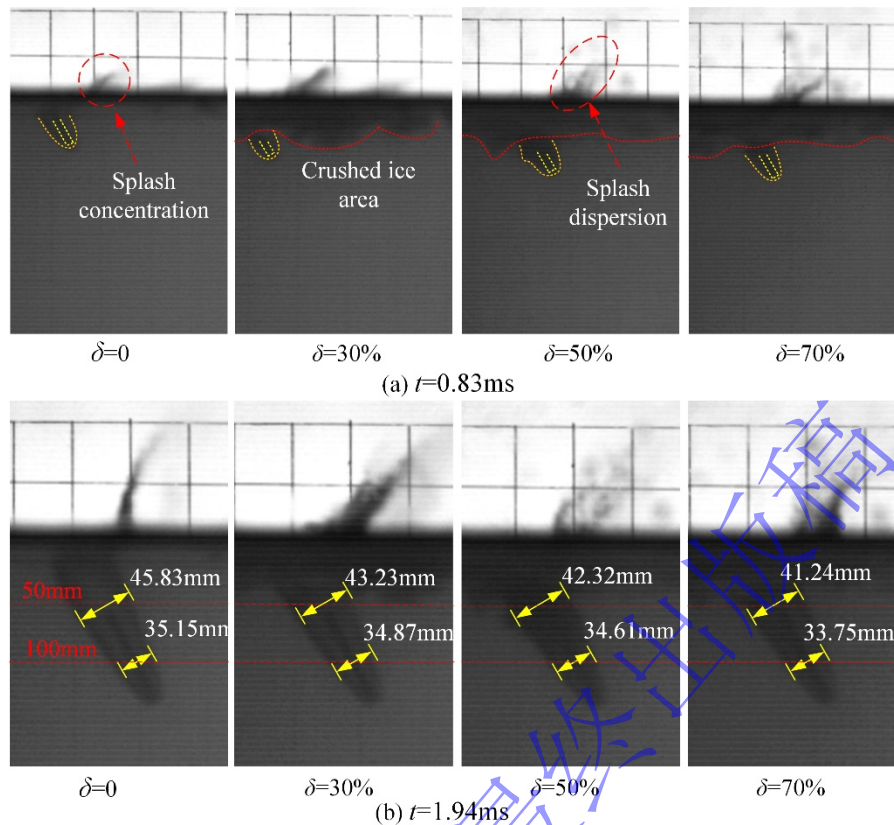


图 4 空泡扩张阶段空泡演化图

Fig.4 Cavity evolution in water-entry cavity expansion stage

为进一步分析碎冰环境对空泡演化的影响，本文对比分析水深 50mm 与 100mm 处不同  $\delta$  值的空泡直径。从图 4(b)可以发现， $\delta=30\%$ 工况相比  $\delta=0$  工况的空泡直径减少 5.67%， $\delta=50\%$ 工况相比  $\delta=0$  工况减少 7.66%，而  $\delta=70\%$ 相比  $\delta=0$  工况减少 10.01%。从上述数据分析可以发现，碎冰抑制了空泡的扩张，导致空泡的直径减小。与无冰工况相比，破碎浮冰环境下结构物入水时，液面碎冰会阻碍能量的有效传递，使得空泡扩张的部分能量会转化为浮冰的动能。此外，由于破碎浮冰对流体流动的阻碍作用，结构物周围流体的扩散速率会降低，这会导致结构物刚入水时所形成的空泡扩张速度较小。从上述分析中可以发现破碎浮冰环境下空泡的扩张行为产生了显著影响。究其原因是在破碎浮冰环境中，空泡扩张过程会受到自由液面碎冰的限制，从而导致在相同水深条件下空泡直径的减小。同时，空泡直径随着  $\delta$  值的增大而减小。这是因为随着  $\delta$  值的增大，自由液面上的破碎浮冰数量会增多，这些破碎浮冰对能量传递以及流体流动的阻碍作用进一步增强，导致 50mm 水深处的空泡直径随着  $\delta$  值的增大而减小。在水深 100mm 处， $\delta=30\%$ 工况与  $\delta=0$  工况的空泡直径相差 0.8%， $\delta=50\%$ 工况与  $\delta=0$  工况相差 1.5%， $\delta=70\%$ 与  $\delta=0$  工况相差 3.98%。这表明浮冰对结构物的空泡扩张影响逐渐减弱，根据空泡截面独立扩张原理可知：空泡的扩张只取决于物体通过截面瞬间的速度大小，阻力、结构物的大小以及无限远处与空泡内的压力差，与空化物体在该时刻之前或之后的运动几乎无关，因此破碎浮冰环境仅影响自由液面处的空泡扩张，并且随着  $\delta$  值的增加，破碎浮冰对空泡扩张的阻碍作用逐渐增强。

图 5 空泡收缩阶段空泡演化图给出了不同工况下结构物入水空泡演化图。从图中 5(a)可以看出，当  $t=3.2\text{ms}$ ， $\delta=0$  工况中空泡尾部在表面张力及环境压力的作用下开始收缩，且迎水面空泡壁轮廓弯曲较大；而  $\delta=30\%$ 工况中空泡壁平直光滑，空泡仍处于扩张阶段。由此可见，破碎浮冰环境延迟了空泡的表面闭合时间。这是因为自由液面处的破碎浮冰由于入水冲击而获得一定的动能，由于碎冰较大的惯性使其保持远离空泡运动的趋势，因而破碎浮冰的运动方向与空泡尾部流体收缩的方向相反，这

极大的延长了空泡的扩张时间；与此同时，外部的空气不断流入空泡，空泡内部空气总量增多，导致空泡内部的压力增大，进而空泡尾部与外界环境压力差减小，这会进一步导致空泡表面闭合延迟。而在无冰环境下，由于液面流体没有受到外部干扰，空泡尾部可以顺畅地向内收缩，因此空气流入总量少，空泡尾部压力远小于外部环境压力，并且其闭合过程相对对称。如图 6 所示。因此，破碎浮冰环境下的空泡闭合时间相比无冰环境下更晚。并且在空泡闭合时，液面碎冰的移动和不规则分布，导致空泡两侧的流体收缩不对称，最终使空泡的闭合过程呈现出非对称性。此外， $\delta=50\%$ 工况与 $\delta=70\%$ 工况空泡迎水面均出现空泡局部溃散现象。前文提到，结构物在穿越自由液面时液面浮冰会阻碍空泡的扩张，而浮冰在挤压空泡表面的同时会破坏空泡壁结构，从而会导致空泡壁发生局部溃散。

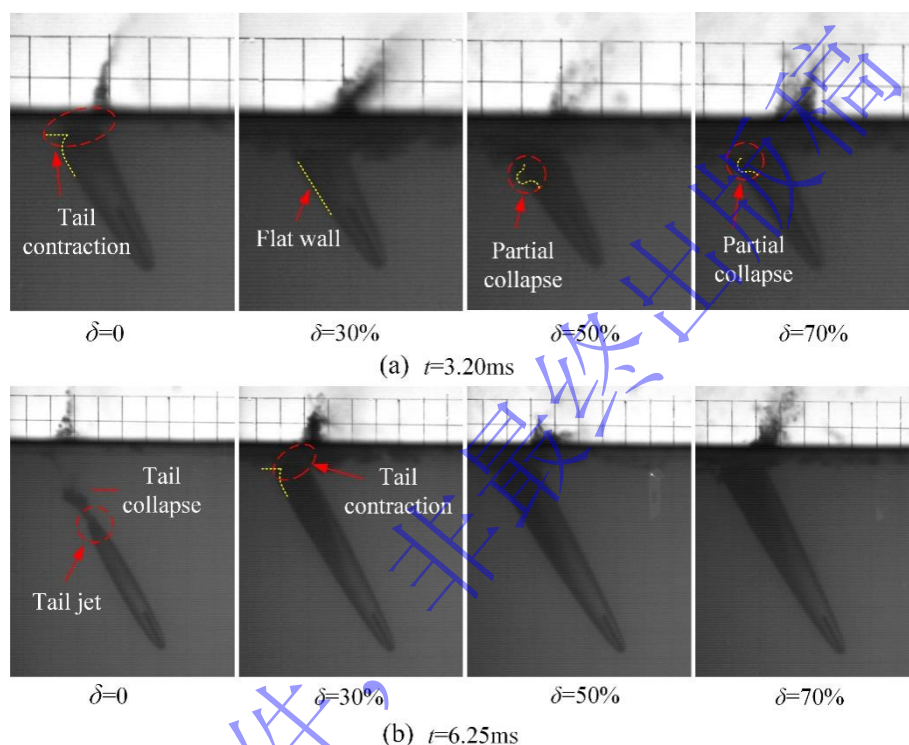


图 5 空泡收缩阶段空泡演化图

Fig.5 Cavity evolution in the cavity contraction stage

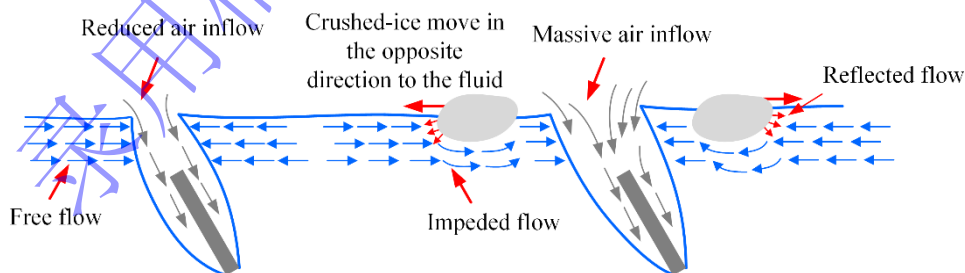


图 6 不同入水条件下的流体特征

Fig.6 Flow characteristic under the different water-entry condition

当  $t=6.25\text{ms}$  时， $\delta=0$  工况空泡已经开始溃灭，并在结构物运动方向产生指向空泡内部的尾部射流，尾部射流出现的原因是在空泡闭合时，其尾部会形成高压区，而空泡内部为相对的低压区，两者之间会形成压力梯度差。随着空泡的不断溃灭，尾部高压区会沿着结构物的运动方向移动。由于空泡内部为空气与水蒸气的混合物，当空泡溃灭一段时间后，空泡内部体积缩小，水蒸气浓度升高。在高压区的影响下，水蒸气发生液化，最终出现尾部射流。此时， $\delta=30\%$ 工况空泡尾部开始收缩闭合，而

$\delta=50\%$ 工况与  $\delta=70\%$ 工况空泡在浮冰的影响下仍处于扩张阶段。

图7 空泡闭合阶段空泡演化图 为空泡表面闭合阶段空泡演化图。从图 7(a)中能够发现, 当  $t=15.29\text{ms}$  时, 在  $\delta=0$  的工况下, 空泡经历一段时间的溃灭后, 与溃灭尾迹发生断裂。随着结构物的持续运动, 尾部射流最终触及结构物的头部, 此时空泡头部的迎水面一侧出现明显的涨起现象。同时, 整个空泡区域的图像呈现出暗淡的特征。究其原因, 当尾部射流到达结构物头部时, 会导致空泡头部压力增大, 进而空泡在压力的作用下发生局部断裂; 尾部射流在向下运动的过程中会形成大量气液混合液滴, 这些液滴会反射入射光线使得透射光强度减弱, 从而导致空泡区成像暗淡。 $\delta=30\%$ 工况空泡开始溃灭, 在其尾部产生气泡簇, 并伴随局部冲击溃灭。此外,  $\delta=50\%$ 工况与  $\delta=70\%$ 工况在迎水面空泡壁均出现褶皱。这一现象的产生, 原因在于结构物入水时, 部分能量会转化为浮冰的动能。随着浮冰的滑移, 其不断对周围流体产生扰动, 导致周围流体流动路径发生偏转, 进而使得周围流体对空泡尾部造成不规则冲击,  $\delta$  值的增大使得液面碎冰数量增加, 加剧了周围流体对空泡壁的冲击。这种冲击导致空泡表面失去了原有的光滑性, 出现了空泡壁褶皱现象。同时,  $\delta=50\%$ 工况出现空泡拉断的趋势, 而  $\delta=70\%$ 工况仍然处于空泡扩张阶段, 前文中分析到破碎浮冰环境结构物的空泡闭合时间延迟, 由此可见, 随着  $\delta$  值的不断增大, 空泡闭合时间越来越晚。随着  $\delta$  值的增大, 结构物周围的破碎浮冰数量增加, 破碎浮冰对液面流体收缩的阻碍作用进一步增强, 导致空泡的闭合时间越来越晚。当  $t=18.48\text{ms}$  时,  $\delta=0$  工况空泡头部出现了明显的坍塌现象, 空泡两侧以及尾部均出现了小尺度的空泡团脱落, 这是因为尾部射流在到达空泡头部后受到空泡边界流体流动影响逐渐向下游发展, 同时空泡外侧的流体压力会导致空泡头部边界出现凹陷, 随着结构物的持续运动, 空泡的凹陷越来越深, 导致空泡在其尾部断开并形成小尺度的空泡脱落。 $\delta=30\%$ 工况结构物在向下运动一段距离后, 溃灭尾迹与空泡拉断, 其空泡末端也出现了指向空泡内部的尾部射流。 $\delta=50\%$ 工况空泡在自由液面以下闭合, 这是因为随着结构物的运动空泡的长度不断增加, 空泡内部空气也随之向下流动, 在空泡外部大气压力与液体压力共同作用下空泡发生闭合。而  $\delta=70\%$ 工况空泡仍未闭合, 空泡尾部与外部空气相连。

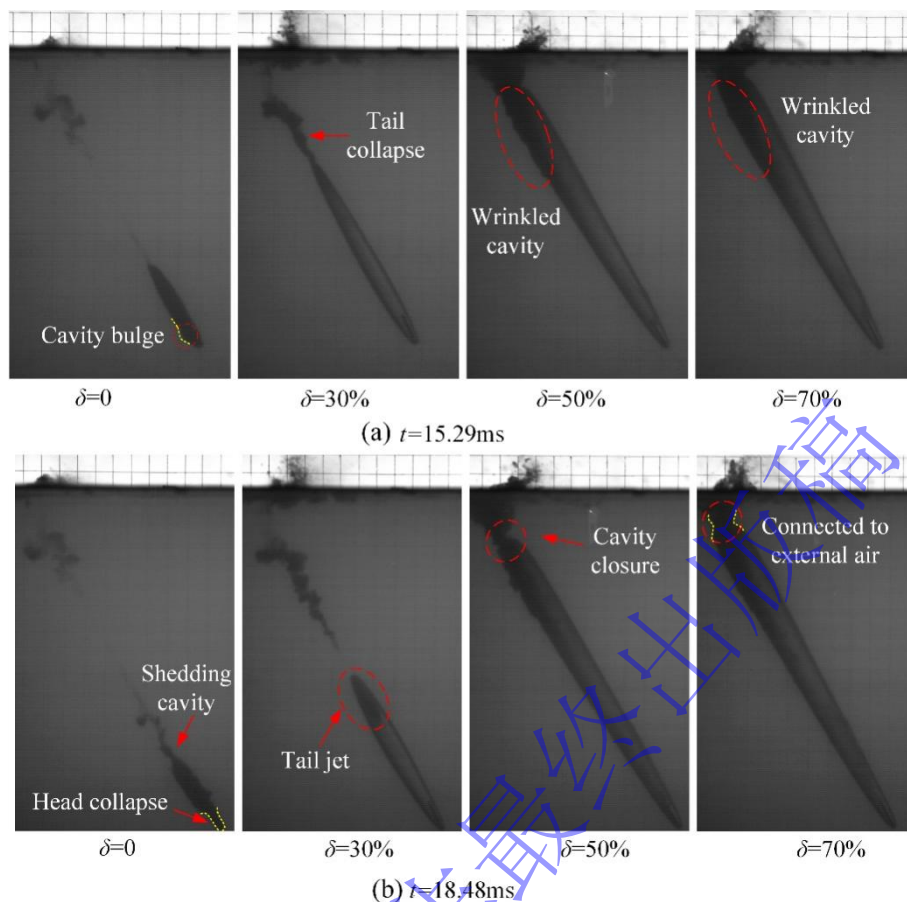


图 7 空泡闭合阶段空泡演化图

Fig.7 Cavity evolution in cavity closure stage

图 8 空泡溃灭阶段空泡演化图 为空泡溃灭阶段空泡演化图，因  $\delta=0$  工况与  $\delta=30\%$  工况空泡已完全溃灭，因此对其不再单独进行分析。当  $t=29.47\text{ms}$  时， $\delta=50\%$  与  $\delta=70\%$  工况空泡溃灭较轻。这是因为空泡在闭合前大量的空气涌入空泡内部，在溃灭的过程中这部分空气只会被压缩，因此空泡溃灭较慢。当  $t=39.62\text{ms}$  时， $\delta=50\%$  工况空泡并没有像  $\delta=0$  工况空泡脱落溃灭，而是发生夹断形成上下两个独立的空泡，且上方的空泡尾迹出现颈缩现象， $\delta=70\%$  工况同样出现空泡夹断现象。结构物在进入自由液面时，会将动能传递给周围的流体，结构物周围的流体获得一定的径向速度，而由伯努利原理可知，流体流速大的地方压强小，因此在压力差的作用下结构物周围的流体动能会逐渐转化为流体压力势能。随着结构物的持续运动，空泡长度持续增加，流体的径向扩张速度逐渐减小为零，在空泡外部环境压力的作用下，流体开始作反向运动，即空泡收缩。由于空泡内部气体分布不均，并且随着入水深度的增加空泡外部的流体压力也越来越大，空泡内部的气体压力无法平衡外部环境压力，使得空泡不同壁面处流体径向运动速度不同，因此出现空泡颈缩现象，随着时间的推移，空泡颈缩区域逐渐收缩变窄，最终发生夹断现象。



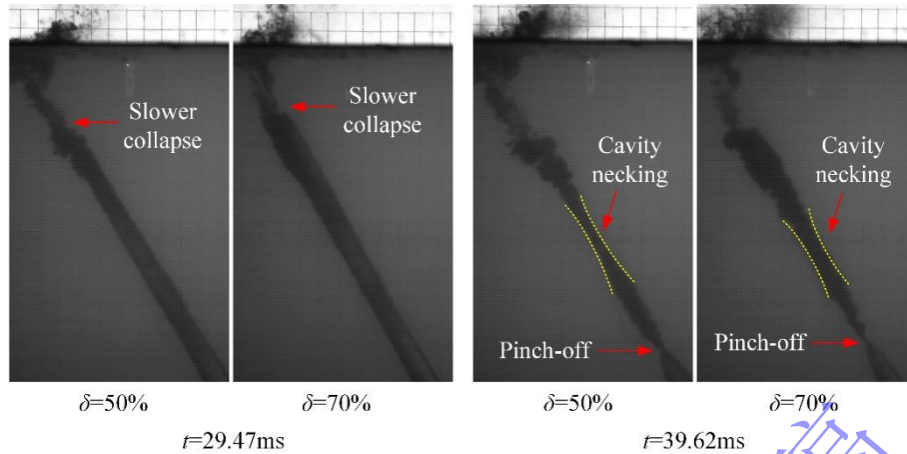
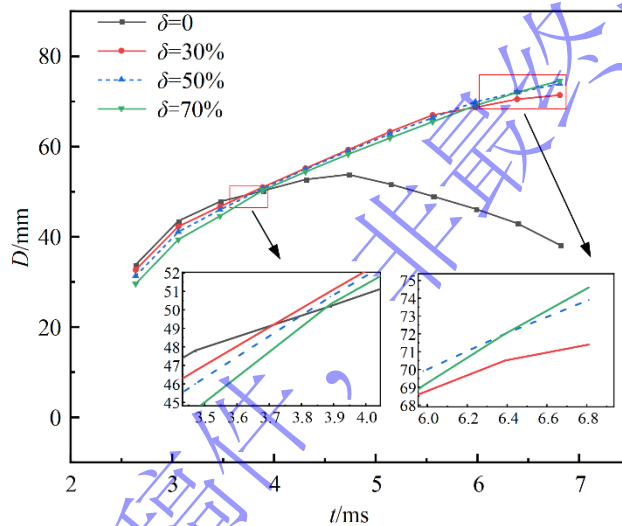


图 8 空泡溃灭阶段空泡演化图

Fig.8 Cavity evolution in cavity collapse stage

为进一步探究破碎浮冰环境对入水空泡的影响规律，选择测量 100mm 水深处空泡直径并进行定



量分析。

图 9 为水下 100mm 处空泡直径随时间的变化曲线，从图中能够看出。 $\delta=0$  工况空泡直径呈现出先增大再减小的趋势，而其它三个工况则表现出持续增长的趋势。这是因为  $\delta=0$  工况在  $t=3.2\text{ms}$  时空泡尾部就出现了收缩的现象，空泡扩张速率减慢，待空泡表面闭合后，在压力的作用下，空泡会随着结构物的运动逐渐收缩拉长，因此空泡直径减小。而其它三个工况则受破碎浮冰的影响，导致空泡的闭合并未在该时间段内发生，因此空泡直径呈现出一直增大的趋势。同时， $\delta=0$  工况在结构物入水前期空泡直径是最大的，随着  $\delta$  值的增大，空泡的直径越来越小。当  $t=6.4\text{ms}$  时， $\delta=30\%$  工况空泡尾部收缩，因此空泡直径增长速率减小，此外， $\delta=70\%$  工况空泡直径最大。图 10 不同工况下空泡长度变化曲线为不同工况下空泡长度变化曲线，从图中能够发现， $\delta=0$  与  $\delta=30\%$  工况曲线变化趋势相似，均呈现出先增大后减小的趋势；而  $\delta=50\%$  与  $\delta=70\%$  工况曲线呈持续增长的趋势。并且在碎冰工况中， $\delta=30\%$  工况在  $t=10\text{ms}$  前的空泡长度最大，这是因为液面碎冰会扰动结构物入水点周围的流体，使得结构物

入水时的流体阻力增大，进而能量消耗增加。随着碎冰数量的增加，结构物亦需克服更大的流动阻力，这会消耗部分用于空泡扩张的能量。

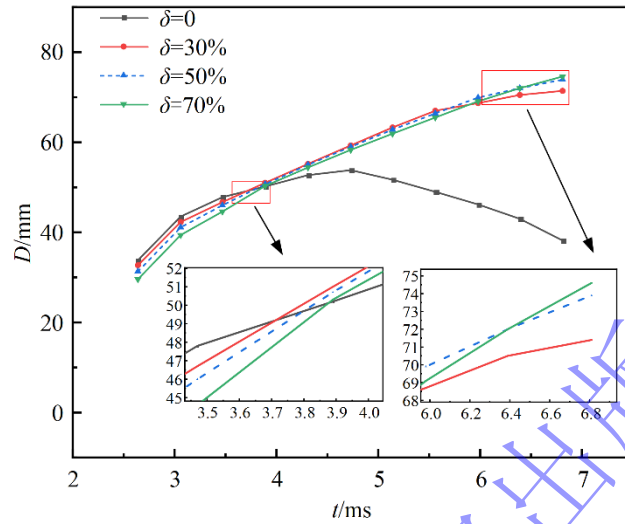


图 9 不同工况下的空泡直径变化曲线

Fig.9 Variation curves of cavity diameter under different working conditions

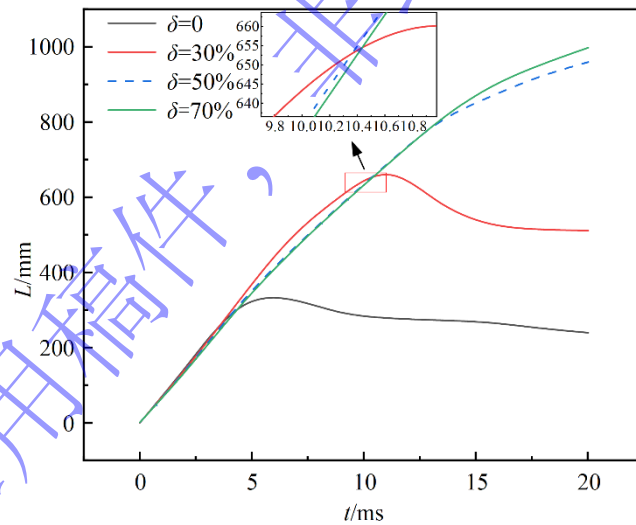


图 10 不同工况下空泡长度变化曲线

Fig.10 Variation curves of cavity length under different working conditions

图 11 不同工况下结构物速度变化曲线为不同工况下速度衰减曲线，从图中可以看出， $\delta=50\%$ 与 $\delta=70\%$ 工况结构物速度衰减曲线相近，并且在结构物入水时的速度衰减幅度较大，随后为 $\delta=30\%$ 工况， $\delta=0\%$ 工况速度衰减幅度最小。结合前文对空泡直径及空泡长度变化曲线的分析，不难发现液面碎冰是导致结构物速度大幅度衰减的主要原因。而液面碎冰数量越多，结构物转移的动能就越多，速度衰减幅度就越大。随着结构物速度的衰减，流体阻力也会随之减小，因此速度衰减速率减小。

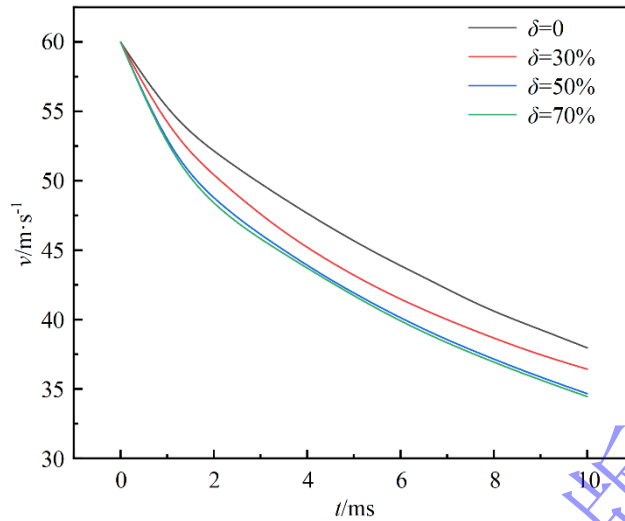


图 11 不同工况下结构物速度变化曲线

Fig.11 Velocity decay curves of structures under different working conditions

### 3 结论

本文利用高速摄影技术,开展了不同破碎浮冰环境下结构物倾斜入水实验,探究了碎冰对结构物倾斜入水空泡演化过程的影响,并分析了不同破碎浮冰环境下结构物空泡结构演化特性,主要得到以下结论:

(1)当空泡扩张时,对比有冰工况与无冰工况,液面处的碎冰会阻碍空泡扩张,导致空泡直径减小。随着 $\delta$ 值的增大,其阻碍作用逐渐增强,从而使得空泡直径进一步减小。特别地,当 $\delta$ 值为50%与70%时,由于浮冰对流体扰动影响较大,致使空泡壁迎水面出现褶皱,并且结构物入水时的速度衰减幅度较大。

(2)在空泡表面闭合时,碎冰工况由于空泡尾部周围流体受液面破碎浮冰的阻碍作用,空泡的扩张时间延长,进而使得空泡内部空气总量增多,液面附近空泡的内外压差减小,以致空泡闭合时间延迟。随着 $\delta$ 值的增大,碎冰对流体的阻碍作用进一步增强,导致空泡的闭合时间越来越晚。

(3)当空泡溃灭时,无冰工况尾部出现指向空泡内部的射流,当尾部射流到达空泡头部时,空泡在环境压力的作用下开始发生坍塌。在 $\delta=50\%$ 与 $\delta=70\%$ 工况下,由于空泡各处环境压力的差异,导致空泡壁因收缩速度不同而出现夹断现象,空泡发生深闭合。

### 参考文献

- [1] 张润东,段金雄,孙铁志,等.自由面碎冰浮冰环境高速入水动力学特性[J].空气动力学学报,2024,42(01):100-112.DOI: 10.7638/kqdlxxb-2023.0191.
- [2] 张军,蔡晓伟,宣建明,等.弹体穿越冰水混合物流动过程的数值模拟[J].弹道学报,2020,32(03):35-40. DOI: 10.12115/j.issn.1004-499X(2020)03-008.  
ZHANG J, CAI X W, XUAN J M, et al. Numerical simulation of flow filed of projectile passing through ice water mixture [J]. Journal of Ballistics, 2020, 32(3): 35-40. DOI: 10.12115/j.issn.1004-499X(2020)03-008.
- [3] 闫雪璞. 浮冰扰动下结构物入水空泡演化及运动特性研究[D].中北大学,2024.DOI: 10.27470/d.cnki.ghbgc.2023.001

- [4] 蔡晓伟,宣建明,王宝寿,等.细长体穿越冰-水混合物的出水流场数值模拟[J].兵工学报,2020,41(S1):79-90. DOI:10.3969/j.issn.1000-1093.2020.S1.012.  
CAI X W, XUAN J M, WANG B S, et al. Numerical simulation of thin body passing through the ice-water mixture flow field [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(S1): 79–90. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.S1.012.
- [5] 杨哲,鹿麟,李强,等.冰孔约束下圆柱体倾斜入水空泡演化与流场特性数值模拟[J/OL].兵工学报:1-16[2024-06-30].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20240119.1434.008.html. DOI: 10.12382/bgxb.2023.0969.
- [6] 张东晓,鹿麟,闫雪璞,等.冰孔约束条件下的弹丸倾斜入水实验研究[J].爆炸与冲击,2023,43(10):96-106. DOI: 10.11883/bzycj-2023-014.  
ZHANG, D., LU, L., YAN, X., et al. Experimental study on oblique water-entry of projectile constrained by ice hole. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(10):96-106. DOI: 10.11883/bzycj-2023-014.
- [7] Lu L, Zhang D, Qi X, et al. Experimental investigation on the cavity evolution characteristics of the high-speed cylinder passing through the ice-hole[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 295: 116940. DOI: 10.1016/J.OCEANENG.2024.116940.
- [8] Tang E, Zhang Z, Chen C, et al. Dynamic response of slender body passing through ice and water mixture at high velocity[J]. *Journal of Mechanics*, 2022, 38: 257-266. DOI: 10.1093/jom/ufac016.
- [9] Hu X, Wei Y, Wang C, et al. Cavity dynamics of the projectile passing through the ice hole[J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, 133(11). DOI: 10.1063/5.0142204.
- [10] Wang H, Huang Z, Huang D, et al. Influences of floating ice on the vertical water entry process of a trans-media projectile at high speeds[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 265: 112548. DOI: 10.1016/J.OCEANENG.2022.112548.
- [11] You C, Sun T, Zhang G, et al. Numerical study on effect of brash ice on water exit dynamics of ventilated cavitation cylinder[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 245: 110443. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.110443.
- [12] Gao C, Lu L, Hu Y, et al. Numerical study on the multiphase flow field of water-entry structure under floating ice environment[J]. 2023. DOI: 10.1049/icp.2023.1937.
- [13] 张健宇. 航行体冰环境约束出水空泡演化及载荷特性研究[D].大连理工大学,2021. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2021.002905.