



不同冰层厚度下结构物倾斜入水空泡演化特性试验研究

杨哲, 王一航, 黄振贵*, 王浩, 万杰, 郭则庆

南京理工大学, 瞬态物理全国重点实验室, 南京 210094

*联系人, E-mail: hzgkeylab@njjust.edu.cn

收稿日期: 2026-04-15; 接受日期: 2026-06-09; 网络出版日期: 2026-09-04

全国重点实验室基金(编号: 2024-CXPT-GF-JJ-095-01)资助项目

摘要 为探究冰层对结构物入水空泡演化的影响规律, 本文基于高速摄影技术, 开展了结构物以140 m/s速度、30°入水角穿越不同厚度冰层的入水试验, 系统分析了冰层厚度对空泡演化过程及冰层破碎特性的影响, 并将空泡演化分为空泡扩张、空泡壁弯曲、空泡收缩及空泡表面闭合四个阶段. 研究表明: 冰层厚度改变了空泡演化进程, 随着冰层厚度增加, 空泡表面闭合时间在不断提前. 当冰层较薄时, 空泡持续扩张且喷溅剧烈; 随着冰层增厚, 结构物破冰消耗的初始动能增大, 传递给水体的径向膨胀动量显著减弱, 此时冰壁面的抑制作用增强, 使空泡壁提前出现褶皱、弯曲及收缩现象, 并最终引发表面闭合; 特别地, 当冰层较厚时, 结构物偏转导致尾部与空泡壁碰撞, 产生尾拍空泡. 背水面以块状碎冰为主, 迎水面则以径向裂纹为主; 随着冰层厚度增加, 碎冰块尺寸减小, 迎水面裂纹数量呈递减趋势.

关键词 破冰入水, 高速入水, 空泡演化, 冰层厚度, 冰层破碎

1 引言

极地海域蕴藏丰富的油气资源与战略航道价值, 并且随着北极海冰持续消融, 极地资源的开发与航道利用已然成为世界各国关注的热点^[1-3]. 因而, 跨介质装备在极地环境下的应用需求日益迫切. 当结构物高速入水时, 必然会与海面冰层发生碰撞, 所以会对结构物的空泡演化过程产生显著影响. 尤其是当结构物以倾斜姿态高速入水时, 冰层的非对称飞溅, 使得空

泡演化过程更加复杂. 因此, 系统开展高速倾斜破冰入水研究, 对于发展适用于冰区海域的先进跨介质装备具有重要的理论意义与工程价值.

结构物入水问题的研究可追溯至19世纪末 Worthington和Cole^[4]的小球入水试验. 此后, 学者围绕入水过程中的空泡演化、冲击载荷、运动稳定性等问题开展了大量研究^[5-8]. 然而, 绝大多数研究基于静水环境开展, 未考虑冰层对入水过程的影响. 此时, 随着极地开发需求的增长, 浮冰区扰动下的结构物入水问

引用格式: 杨哲, 王一航, 黄振贵, 等. 不同冰层厚度下结构物倾斜入水空泡演化特性试验研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2027, 57: 214714

Yang Z, Wang Y, Huang Z, et al. Experimental study on cavity evolution characteristics of an inclined water-entry structure under different ice layer thicknesses (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2027, 57: 214714, doi: [10.1360/SSPMA-2026-0291](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2026-0291)

题逐渐成为研究热点. 根据浮冰形态的不同, 可将现有研究分为三类: 冰孔约束入水、浮冰环境入水以及冰层破冰入水.

对于冰孔约束入水问题, Lu等人^[9-11]通过高速摄影技术开展了不同直径冰孔约束下结构物倾斜入水试验, 发现冰孔壁面阻碍空泡扩张, 形成反射流并导致空泡壁面局部褶皱. Hu等人^[12-14]采用计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)对射弹穿越冰孔入水进行了模拟, 揭示了冰孔对入水空泡演化的影响机制. 上述研究虽涉及倾斜入水, 但均假设冰层中已存在预设冰孔, 未考虑结构物直接撞击破冰的过程.

对于浮冰环境下的入水问题, 研究者们关注的是存在大量离散浮冰的复杂水面. Wang等人^[15,16]通过数值模拟研究了结构物在浮冰缝隙中的垂直入水过程, 发现浮冰改变了初始喷溅形态, 延缓了空泡闭合, 并导致射弹轨迹发生偏转. Hu等人^[17,18]采用计算流体力学-离散元法(Computational Fluid Dynamics-Discrete Element Method, CFD-DEM)数值研究了结构物穿越碎冰区的入水动力学, 揭示了碎冰颗粒与空泡壁面的相互作用机制. Lu等人^[19,20]通过高速摄影实验研究了碎冰覆盖率对入水空泡演化的影响. 此研究虽然考虑了浮冰的影响, 但浮冰被视为可移动的未破碎颗粒, 与完整冰层存在本质差异, 且多集中于垂直入水.

对于冰层破冰入水问题, 研究者们开始关注结构物直接撞击并穿透冰层的强流固耦合过程. Cui等人^[21]基于耦合欧拉-拉格朗日(Coupled Euler-Lagrange, CEL)数值方法对射弹高速垂直破冰入水进行了模拟, 分析了不同冰厚对空泡形态与裂纹扩展的影响. 黄振贵等人^[22]采用CEL数值方法进一步研究了速度对破冰入水过程的影响, 发现低速度时冰孔尺寸小、空泡发展受阻, 高速度时空泡闭合延迟. Ren和Zhao^[23]基于边界数据浸没法(BDIM)与近场动力学数值方法建立了冰-水-结构物耦合模型. Lu等人^[24]通过高速摄影开展了不同冰厚条件下的结构物垂直破冰入水试验, 研究了冰层对空泡演化与运动特性的影响, 发现冰层导致速度衰减加剧、空泡尺寸减小, 且裂纹呈冰孔+径向裂纹的破坏模式. Wu等人^[25]同样采用高速摄影实验方法, 研究了不同速度下结构物垂直破冰入水过程, 发现高速工况下冰层对空泡的干扰显著减弱.

然而, 上述破冰入水研究存在两个方面问题: (1) 几乎全部局限于垂直入水工况, 对倾斜破冰入水过程

研究甚少. (2) 多数研究集中于低速条件(<100 m/s), 对高速(>100 m/s)破冰入水研究相对匮乏. 在真实极地作战与探测场景中, 跨介质装备以高速、倾斜姿态入水, 以实现快速响应与精确打击. 此时, 结构物与冰层的相互作用强度远超低速工况, 冰层破碎模式与空泡演化特性均呈现显著差异. 基于上述研究空白, 本文基于高速摄影技术搭建了倾斜破冰入水试验系统, 在入水速度(140 m/s)条件下, 开展不同冰层厚度的倾斜破冰入水试验研究, 并系统分析冰层厚度对倾斜破冰入水过程中冰层失效模式与空泡流动特性的影响规律, 揭示高速倾斜破冰条件下空泡的形成、演化与溃灭机制, 阐明其通过改变水动力对入水弹道的影响机理. 本文研究成果可为提高极地跨介质装备的冰层突防能力与运动控制设计提供试验依据与理论支撑.

2 试验装置

为研究结构物高速倾斜破冰入水动力学特性, 搭建了基于高速摄影技术的试验系统, 主要包括发射系统、角度调节机构、冰层固定装置、水箱及高速摄影系统, 如图1所示. 发射系统采用高压气源驱动, 通过电磁阀瞬时释放高压气体, 并将结构物加速至目标速度(140 m/s), 发射初始速度变化控制在 $\pm 2\%$ 以内. 角度调节机构采用半圆形调角圆盘与锁紧装置相结合的结构, 可在 10° – 90° 范围内调节入水角度, 调节精度为 $\pm 0.1^\circ$, 发射基座处安装数字式角度水平仪用于精确读数. 结构物的材料为45号钢, 直径 $D = 11$ mm, 长度 $L = 66$ mm.

图2展示了制冰模具和制备完成的冰板. 冰板采用模具浇筑法制备, 将水注入圆形模具后, 置于 -15°C 恒温低温箱中冻结24 h以上, 以获得结构致密、脆性特征显著的冰层. 冰层固定采用双杆限位结构, 由两根平行布置的刚性杆组成, 杆件两端固定于水槽两侧, 间距略大于冰板直径. 冰板置于两杆之间, 呈点接触状态, 如图3所示. 该布置方式能有效约束冰板水平漂移, 确保结构物发射轨迹与冰板中心对准, 同时点接触形式最大限度地减小了对冰层运动及破碎过程的干扰, 保证破冰过程的自然发展.

此外, 采用Phantom VEO 410L高速摄像机拍摄入水过程, 帧率为6400 fps, 分辨率为 1280×600 , 通过同步触发器与发射系统联动. 背景光源为点光源, 经匀光

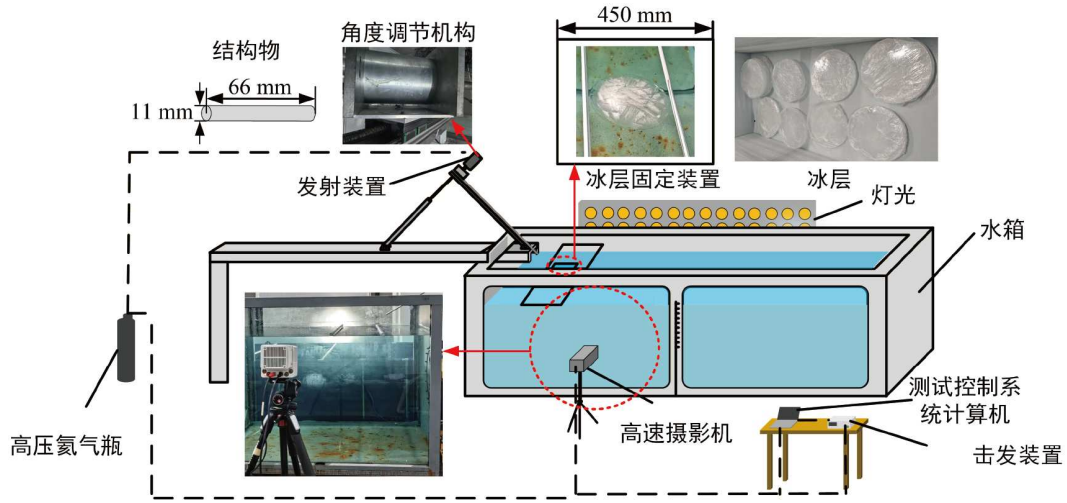


图 1 (网络版彩图)结构物倾斜破冰入水试验系统示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the experimental system for oblique ice-breaking water entry of a structure.

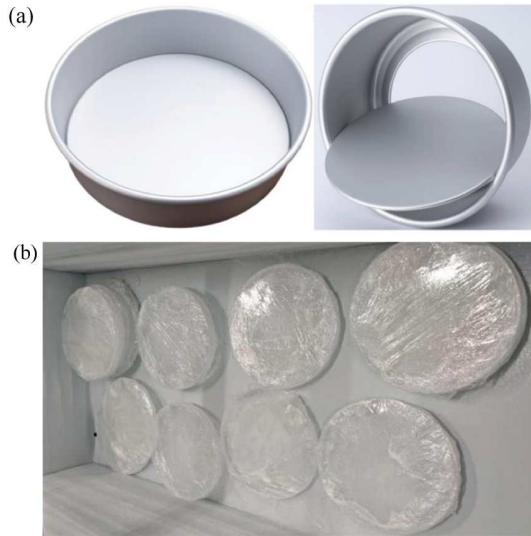


图 2 (网络版彩图)层冰环境的制备. (a) 制冰模具; (b) 冻制的层冰

Figure 2 (Color online) Preparation of layered ice environment. (a) Ice-making mold; (b) frozen layered ice.

处理后提供均匀照明. 为获得结构物的空泡轮廓, 采用数字图像处理方法, 且该方法得到了广泛的适用性^[9,25]. 引入双边滤波法(1)与校正算法(2)来进一步精确捕捉空泡特性.

$$\text{Pixel}_{\text{new}} = \frac{\sum_i \text{Pixel}_i \times \text{Weight}_i}{W}, \quad (1)$$

式中, $\text{Pixel}_{\text{new}}$ 是中心像素的新值, Pixel_i 是中心像素的



图 3 (网络版彩图)层冰环境布置情况

Figure 3 (Color online) Layout of the layered ice environment.

相邻像素值, Weight_i 是 Pixel_i 的权重, W 是所有权重的总和.

$$h_{\text{real}} = \left(\frac{x_2}{x_1 + x_2} + \frac{x_1}{\sqrt{n^2(x_1 + x_2) + (n^2 - 1)h_{\text{measure}}^2}} \right) h_{\text{measure}}, \quad (2)$$

式中, x_1 和 x_2 分别为高速相机镜头和结构物到水箱前钢化玻璃的距离, 均为常数, 其中 $x_1 = 1.0 \text{ m}$, $x_2 = 0.75 \text{ m}$; h_{measure} 为结构物运动深度的测量值; h_{real} 为结构物运动深度的实际值; $n = 1.53$ 为折射率.

为验证本试验发射系统的稳定性与测量数据的可靠性, 在入水速度 110 m/s 、入水角度 30° 下重复进行3次试验. 图4展示了3次重复试验中空泡尺寸的测量结果, 经计算, 最大相对误差为8.4%. 考虑到高速破冰过程的强非线性与随机性, 上述偏差处于可接受范围内, 表明破冰入水试验系统具有良好的重复性与稳定性.

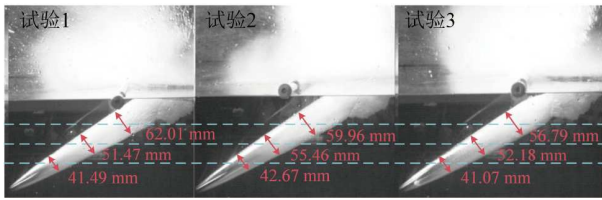


图 4 (网络版彩图)试验重复性验证

Figure 4 (Color online) Experimental repeatability verification.

3 结果与讨论

在本研究中, 结构物入水初速度为140 m/s, 不同工况的示意图如图5所示. 入水动能巨大, 水体获得的向外扩张动量在观测时间内占主导地位, 导致大部分工况下的入水空泡始终处于剧烈的扩张状态. 为了阐述结构物穿越冰层入水空泡演变过程, 选取大冰厚工况($\delta = D_i/D = 4.0$)作为基准研究冰层影响下的入水空泡演化过程, 根据特征变化可将其演化过程划分为四个主要阶段: 空泡扩张阶段、空泡壁弯曲阶段、空泡收缩阶段以及空泡表面闭合阶段.

图6为空泡扩张阶段结构物穿越不同厚度冰层入水空泡演化图. 与垂直入水相比, 结构物倾斜撞击自由液面后会产生明显的非对称表面喷溅. 此时入水点附近的水体获得向外扩张的动能, 进而形成入水空泡, 这一现象在无冰(Ice-Free)工况下清晰可见. 而在结构物破冰入水过程中, 表面喷溅的范围与非对称性在不断增加, 这是因为结构物撞击冰层过程中, 产生了大量的碎冰飞溅, 碎冰飞溅与水花飞溅相混合, 形成了更大面积的喷溅. 对比图6无冰环境与 $\delta = 2.5$ 工况可以

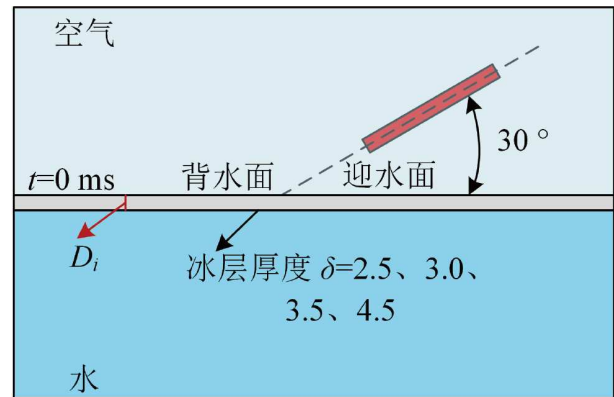


图 5 (网络版彩图)结构物穿越不同厚度冰层入水示意图

Figure 5 (Color online) Schematic diagram of a structure entering water through ice layers of different thicknesses.

发现, 迎水面一侧的空泡壁出现褶皱. 这源于冰层破碎后, 高速运动的碎冰块对空泡壁面产生了无规则的冲击与扰动, 改变了局部流场分布, 导致空泡壁面失稳, 从而形成褶皱. 此外, 从图6中还能看出随着冰层厚度的不断增加, 表面喷溅的面积不断增大. 其主要原因在于, 结构物撞击冰层时产生大量高速飞溅碎冰的数量随冰厚的增加而增加, 这些碎冰与水体飞溅相互混合、裹挟, 共同形成了面积更大、形态更复杂的喷溅区域. 同时, 从迎水面单侧空泡干扰转化为双侧扰动, 值得注意的是, 背水面一侧的扰动主要表现为局部亮度的增强, 而非空泡形态的直接改变. 为验证该亮度变化, 提取了不同冰层厚度下空泡内部的灰度值, 并绘制灰度值变化曲线如图7所示. 随着冰层厚度增加, 空泡内部的平均灰度值逐渐降低, 即内部区域呈现出明确的变暗趋势.

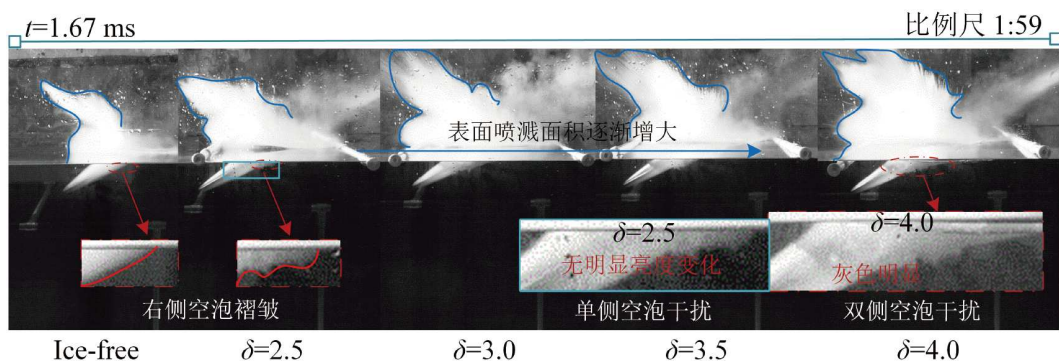


图 6 (网络版彩图)空泡扩张阶段结构物穿越不同厚度冰层入水空泡演化图

Figure 6 (Color online) Cavity evolution of a structure entering water through different ice layer thicknesses at the cavity expansion stage.

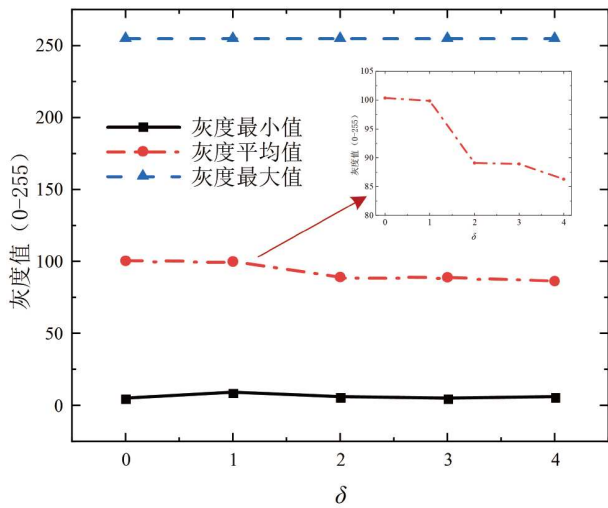


图 7 (网络版彩图)空泡收缩阶段不同厚度空泡内部灰度值变化曲线

Figure 7 (Color online) Gray value variation curves inside the cavity under different ice thicknesses during the cavity contraction stage.

随着结构物入水时间的增加, 无冰与低冰厚工况 ($\delta \leq 3.0$) 的空泡始终处于扩张阶段, 且喷溅随时间持续增大, 如图 8 所示. 究其原因, 无冰环境下结构物极高初速使流场处于惯性力主导地位, 静水压力尚不足以平衡径向动量, 导致空泡持续膨胀. 而当冰层厚度小

时, 破冰入水形成的冰孔面积更大, 有利于空气进入空泡内部, 导致空泡扩张阶段延长. 随着冰厚 δ 增加, 结构物穿透冰层产生的碎冰量激增, 碎冰与水花剧烈耦合、裹挟, 显著提升了表面喷溅的面积. 当 δ 增至 3.5 及 4.0 时, 表面喷溅面积显著扩张, 且 $\delta = 4.0$ 工况率先诱发了背水面的空泡壁弯曲现象. 首先, 随着冰层厚度增加, 结构物在高速撞击破冰的过程中消耗了更多的初始动能, 导致其入水后传递给周围水域的流体动能大幅锐减. 其次, 在撞击过程中, 冰层的破碎呈现出“先形成穿透冰孔, 随后水体再向外扩散”的特征. 此时, 较厚的冰层作为刚性边界提供了更为强烈的结构阻力, 进一步消耗并限制了水体向外扩张的能量. 在这两方面因素的共同作用下, 流体的径向扩张动力发生显著衰减, 局部流场受力失衡, 最终导致了 $\delta = 4.0$ 工况下空泡壁面弯曲现象的发生.

图 9 为空泡收缩阶段结构物穿越不同厚度冰层入水空泡图. 无冰与低冰厚工况 ($\delta \leq 3.5$) 的空泡仍然处于扩张阶段, 这与上述原因相一致. 同时, 还能从图 9(a) 中发现, 在 $h = 69 \text{ mm}$ 与 154 mm 水深处, 空泡直径随着冰层厚度的不断增加而减小. 此时的水下深度已远离冰层直接干扰, 由空泡独立扩张原理^[26](Logvinovich Principle)可知, 任意水深处空泡截面的径向扩张特征,

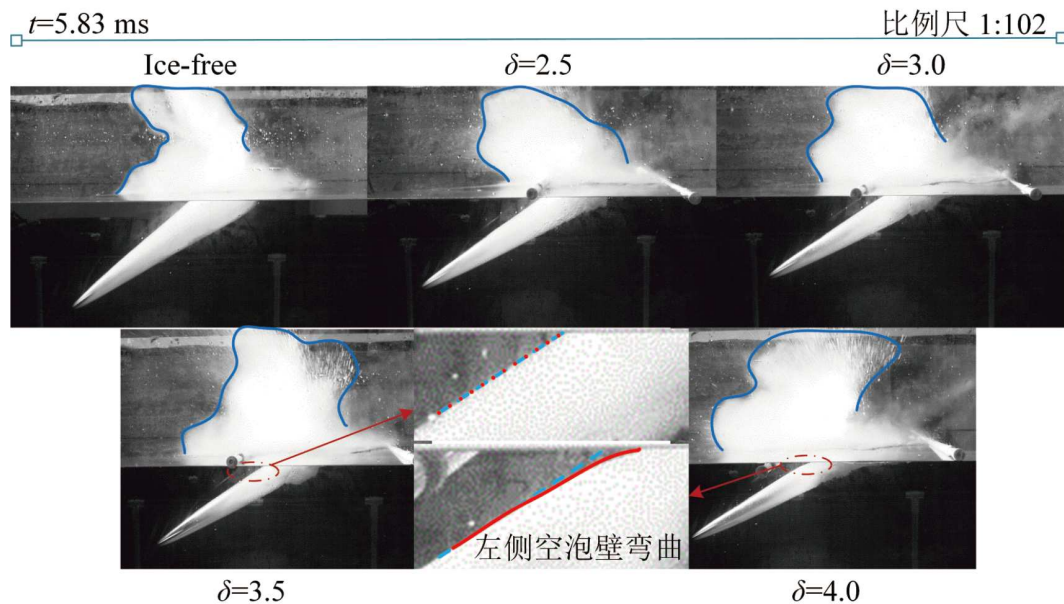


图 8 (网络版彩图)空泡弯曲阶段结构物穿越不同厚度冰层入水空泡演化图

Figure 8 (Color online) Cavity evolution of a structure entering water through different ice layer thicknesses at the bending stage.

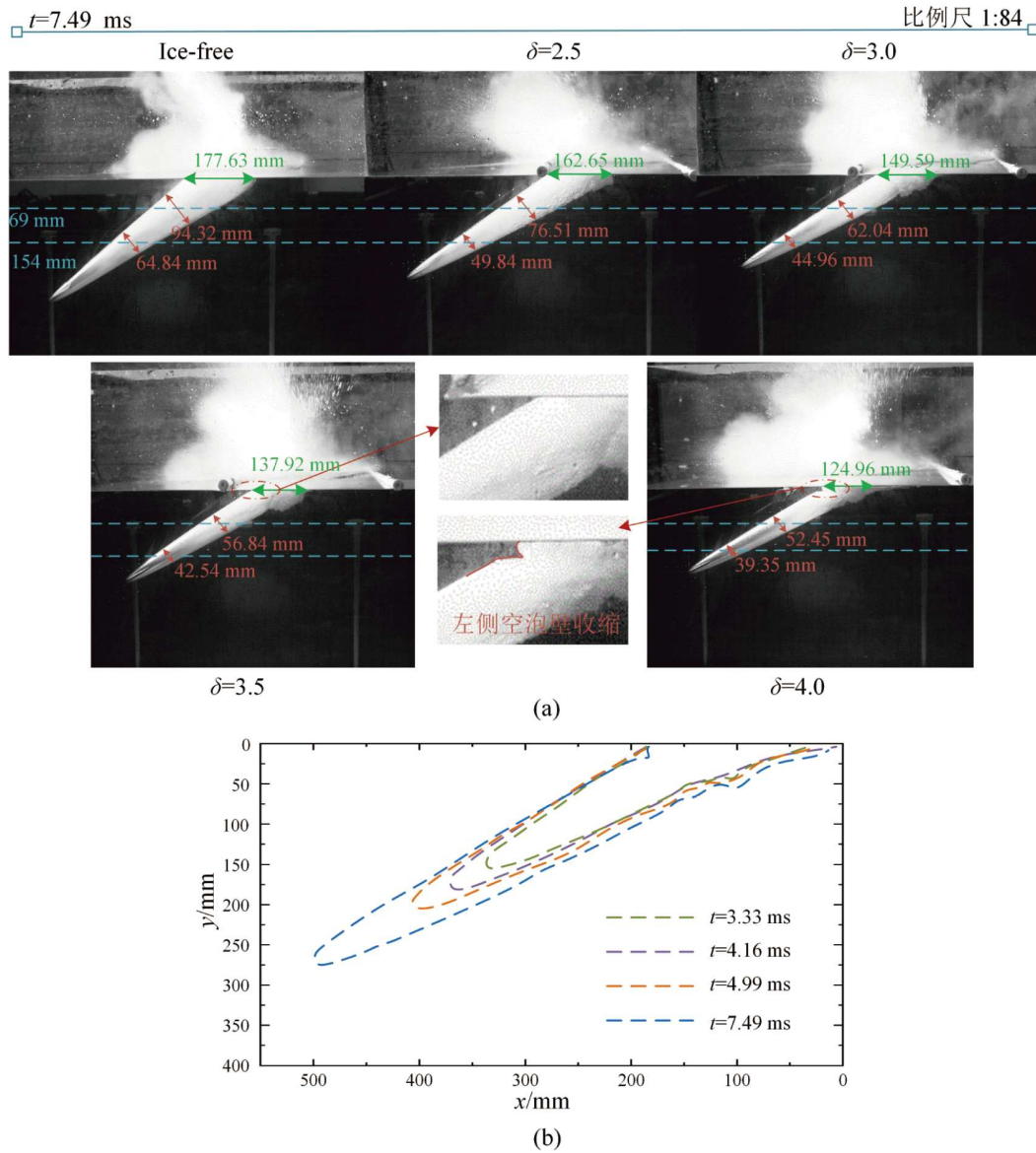


图 9 (网络版彩图)空泡收缩阶段结构物穿越不同厚度冰层入水空泡图. (a) 空泡试验图; (b) $\delta = 4.0$ 工况空泡轮廓图

Figure 9 (Color online) Cavity at the contraction stage of a structure entering water through different ice layer thicknesses. (a) Experimental image of the cavity; (b) cavity contour for the case of $\delta = 4.0$.

主要取决于结构物穿越该截面瞬间所赋予流体的动能. 冰层越厚, 结构物在穿透冰层阶段消耗的初始动能越多, 导致其入水至69和154 mm深度时的瞬时速度大幅衰减. 因此, 结构物在此深度传递给周围水体的径向膨胀动量显著减弱, 最终表现为同一深度下空泡直径随冰厚递减, 其定量规律如图10所示. 值得注意的是, 在 $\delta = 4.0$ 工况下, 自由液面附近的背水面空泡壁率先出现了收缩现象. 一方面, 最厚冰层导致了极大的初始

动能耗散, 使得液面附近水体获得的初始径向扩张惯性最为微弱, 并随时间迅速耗散. 另一方面, 较厚的冰孔严重阻碍了外部大气向空泡内部的通气补给, 导致空泡内部压力骤降. 在内部低压与外部环境水体压力的联合挤压下, 内外压差迫使该区域空泡壁的径向膨胀速度迅速降至零, 并发生反向运动, 从而呈现出明显的空泡壁面收缩, 详见图9(a)中的局部放大图. 此外从图9(b)轮廓图中也能看出此时背水面空泡壁出现了

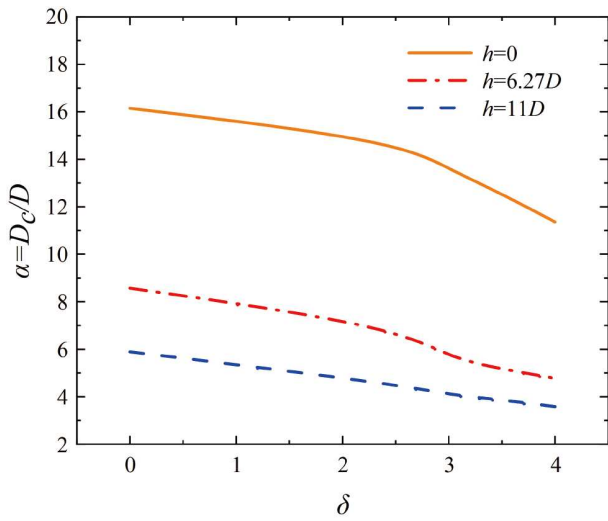


图 10 (网络版彩图)空泡收缩阶段不同水深位置空泡直径变化曲线
Figure 10 (Color online) Variation curve of cavity diameter at the cavity contraction stage.

收缩, 迎水面的褶皱随着时间的增大而扩张.

如图 11 所示, 冰层厚度改变了空泡壁从弯曲、收缩至闭合的入水空泡演化过程. 在无冰工况下, 空泡仍处于持续扩张阶段. 而在 $\delta = 2.5$ 工况下, 空泡呈现出显著的非对称扩张特征: 其背水面继续扩张, 而迎水面则率先出现明显的空泡壁褶皱. 这种非对称空泡演化主要源于倾斜破冰过程中能量分配、边界约束及介质分布的差异. 由于结构物倾斜撞击, 背水面流场获得了更多沿侵入方向的膨胀动能, 且该侧冰层破碎更为彻底, 径向扩张的阻力较小; 反之, 迎水面获得的径向动能相对较弱, 且面临相对完整的冰层边界. 与此同时, 迎水面一侧完全被水体包围, 而背水面一侧为水与气体的混合区域, 这使得结构物推开水体所需的侧向力在两侧不对称, 进一步加剧了空泡的非对称发展. 此时迎水面完整冰层产生的壁面效应对近壁面流体产生了强烈的黏性阻滞, 导致同一侧上下水域产生显著

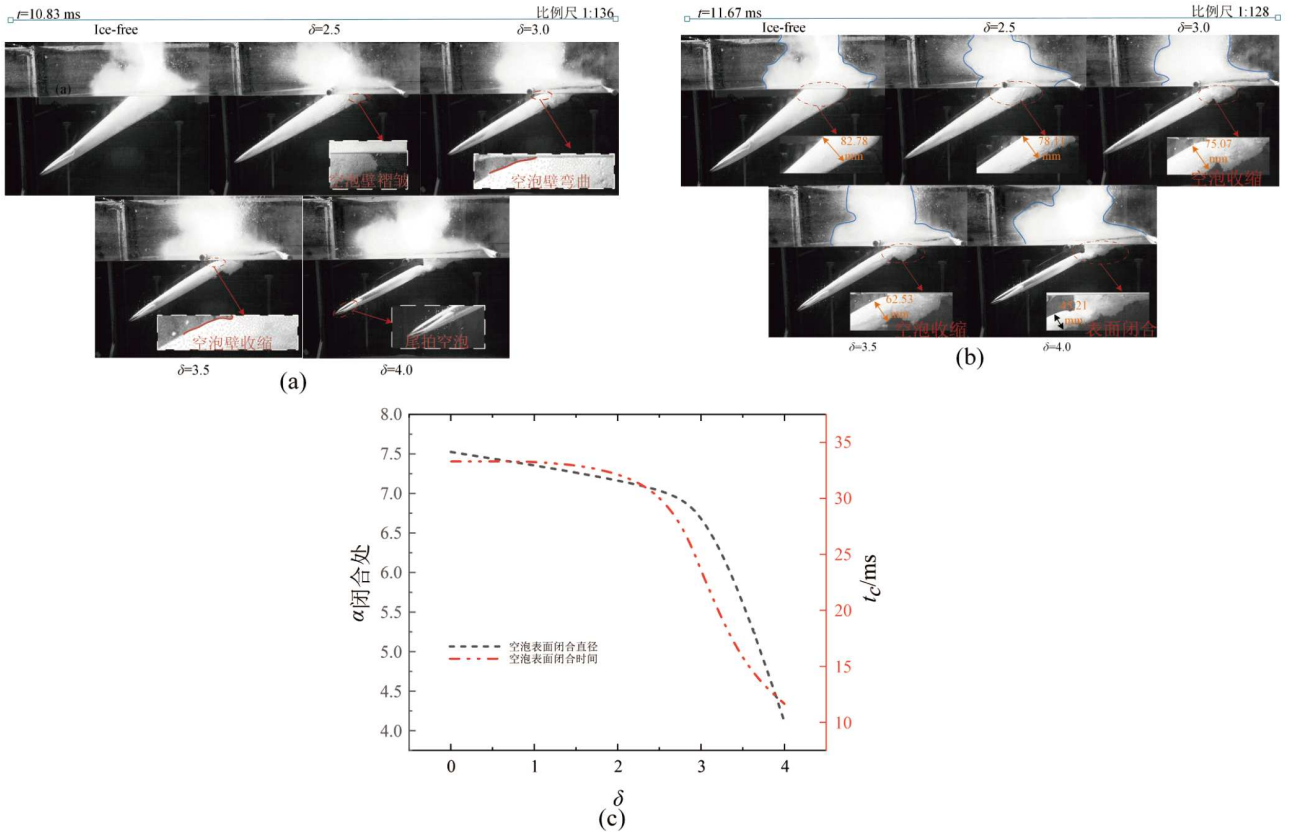


图 11 (网络版彩图)空泡表面闭合阶段结构物穿越不同厚度冰层入水空泡演化. (a) $t = 10.83$ ms 空泡演化特征; (b) $t = 11.67$ ms 空泡演化特征; (c) 空泡闭合直径随时间变化曲线

Figure 11 (Color online) Cavity evolution of a structure entering water through different ice layer thicknesses at the surface closure stage. (a) Cavity evolution characteristics at $t = 10.83$ ms; (b) cavity evolution characteristics at $t = 11.67$ ms; (c) variation of cavity closure diameter with time.

的流速梯度, 这种速度剪切带来的差异性最终诱发了空泡壁的褶皱.

此外, 从图11(a)中看出随着冰厚进一步增加, $\delta = 3.0$ 工况下的空泡壁弯曲以及 $\delta = 3.5$ 工况下的双侧收缩现象愈发显著, 并表现出即将发生表面闭合的趋势. 在外部静水压力与内部低压所构成的逆向压差驱动下, 水体径向扩张的动能被迅速耗散并发生反向回抽, 迫使空泡壁快速收缩, 具体如图11(b)所示. 值得注意的是, 冰层越厚, 结构物破冰所消耗的初始动能越多, 造成传递给液面附近水体的径向膨胀动量就越小, 这使得 $\delta \geq 3.0$ 工况下闭合处空泡的临界直径也随着冰层厚度的增加而呈现出明显的递减规律, 同时空泡闭合时间也随之减小, 如图11(c)所示. 除此之外, 从图11(a)中还可以发现, 当 $\delta = 3.5$ 和 4.0 时出现了尾拍空泡. 这是由于结构物发生了明显偏转, 使其尾部与空泡壁面发生碰撞, 从而诱发了尾拍现象.

由于结构物以 140 m/s 倾斜破冰, 且试验的危险性较大, 只能在入水后收集冰层破碎飞溅的冰层, 且收集难度较大. 图12为结构物破冰入水后冰层破碎试验图像, 此时的背水面与迎水面划分与图4一致. 从图12中可以看出, 背水面主要以碎冰块为主, 而迎水面的冰层主要为径向裂纹的形式. 在结构物以 30° 入水角倾斜撞击瞬间, 背水面首先承受结构物的强烈挤压与剪切作用. 由于法向与切向应力的叠加, 该区域冰层内部的剪切应力迅速超过其极限强度, 引发密集的裂纹交织, 最终导致冰层形成块状碎冰. 相比之下, 迎水面受到的直接撞击载荷较小, 主要受结构物侵入引发的弯曲波与周向拉伸应力影响, 因此破坏形式以能量释放较慢的径向裂纹为主. 此外, 从图12中还能看出随着冰层厚度 δ 的增加, 背水面仍然为碎冰块, 且迎水面的裂纹数量呈递减趋势. 这是因为厚冰层具有更高的弯曲刚度与结构强度, 能够吸收更多的撞击动能. 随着 δ 增大, 虽然单次破碎所需的能量增加, 但冰层整体的抗变形能力限制了裂纹扩展, 导致观察到的裂纹数量减少.

4 结论

本文通过高速摄影技术, 研究了结构物以 140 m/s 入水速度、 30° 入水角穿越不同厚度冰层的破冰入水过程, 系统分析了冰层厚度对空泡演化与冰层破碎特性的影响规律, 得到以下主要结论.

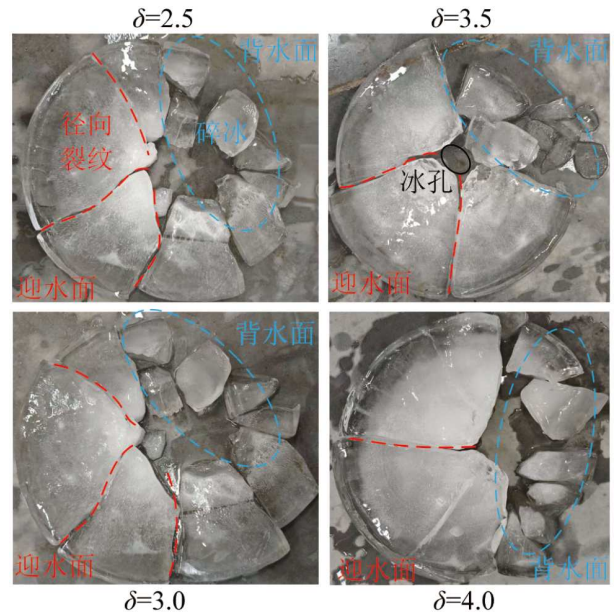


图 12 (网络版彩图) 结构物破冰入水冰层试验图

Figure 12 (Color online) Experimental image of the ice layer during ice-breaking water entry of a structure.

(1) 冰层厚度显著改变了空泡演化进程, 随着厚度增加, 空泡提前经历弯曲、收缩直至表面闭合. 无冰及薄冰工况下, 结构物高速入水提供的径向动量占主导地位, 空泡持续扩张; 当冰厚增加至 $\delta = 3.5$ 以上时, 结构物破冰消耗的初始动能显著增大, 传递给水体的膨胀动量锐减, 同时冰孔对空气通气的抑制作用增强, 内外压差加剧, 导致空泡壁提前出现弯曲、收缩及表面闭合现象. 此外结构物发生明显偏转, 其尾部与空泡壁面发生碰撞, 从而诱发尾拍现象.

(2) 在远离冰层的区域(69及154 mm水深), 空泡直径随冰厚增加而减小. 其原因在于: 冰层越厚, 结构物穿透冰层消耗的初始动能越多, 导致入水至该深度时的瞬时速度大幅衰减, 传递给周围水体的径向膨胀动量随之减弱, 最终呈现为空泡直径随冰厚增加而递减, 空泡闭合时间也随之减小.

(3) 背水面承受结构物的直接挤压与剪切作用, 形成密集裂纹交织并产生块状碎冰; 迎水面主要受弯曲波与周向拉伸应力影响, 破坏形式以径向裂纹为主. 随着冰层厚度增加, 背水面碎冰块尺寸减小, 迎水面裂纹数量呈递减趋势, 这是由于厚冰层具有更高的弯曲刚度与结构强度, 虽然单次破碎所需能量增加, 但整体抗变形能力限制了裂纹扩展.

参考文献

- 1 Nam J H, Park I, Lee H J, et al. Simulation of optimal arctic routes using a numerical sea ice model based on an ice-coupled ocean circulation method. *Int J Naval Archit Ocean Eng*, 2013, 5: 210–226
- 2 Guo R, Sun T Y. The Arctic strategy under ROK's "New Northern Policy": Process and constraints (in Chinese). *J Int Relat*, 2020, 2020(3): 136–153 [郭锐, 孙天宇. 韩国“新北方政策”下的北极战略: 进程与限度. *国际关系研究*, 2020, 2020(3): 136–153]
- 3 Li D H, Zhang Y N. The impact of arctic ice melting on China's geo-economy (in Chinese). *J Shandong Univ (Philos Soc Sci)*, 2020, 2020(4): 111–121 [李大海, 张荧楠. 北极冰融对我国地缘经济的影响. *山东大学学报(哲学社会科学版)*, 2020, 2020(4): 111–121]
- 4 Worthington A M, Cole R S. IV. Impact with a liquid surface studied by the aid of instantaneous photography. Paper II. *Philos Trans R Soc London Ser A*, 1900, 194: 175–199
- 5 Sui Y T, Zhang A M, Ming F R, et al. Experimental investigation of oblique water entry of high-speed truncated cone projectiles: Cavity dynamics and impact load. *J Fluids Struct*, 2021, 104: 103305
- 6 Chen T, Huang W, Zhang W, et al. Experimental investigation on trajectory stability of high-speed water entry projectiles. *Ocean Eng*, 2019, 175: 16–24
- 7 Liu X, Cai X, Huang Z, et al. Comparative study on the oblique water-entry of high-speed projectile based on rigid-body and elastic-plastic body model. *Def Tech*, 2025, 46: 133–155
- 8 Zhang L, Ming F R, Lin X, et al. Governing mechanisms of structural damage from underwater contact explosions induced by shock-wave and bubble loading. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2026, 69: 264712
- 9 Lu L, Chen K, Zhang D, et al. Cavity evolution of the high-speed cylinder entering the water under different ice-hole diameter constraints. *Appl Ocean Res*, 2023, 141: 103788
- 10 Lu L, Yang Z, Qi X, et al. Analysis of the influence of ice-hole constraint on the oblique water-entry characteristics of a high-speed cylinder. *Phys Fluids*, 2024, 36: 073334
- 11 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. *Ocean Eng*, 2024, 295: 116940
- 12 Hu X, Wei Y, Wang C, et al. Analysis of the cavity evolution law of the projectile passing through the underwater ice-hole. *Ocean Eng*, 2022, 266: 113164
- 13 Hu X, Wei Y, Wang C, et al. Analysis of influencing factors of the projectile entering the water through the ice hole. *Ocean Eng*, 2023, 280: 114563
- 14 Hu X, Wei Y, Wang C. Hydrodynamics of the projectile entering the water under the ice hole constraint environment. *Phys Fluids*, 2023, 35: 043305
- 15 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. *Ocean Eng*, 2022, 265: 112548
- 16 Wang H, Luo Y, Chen Z, et al. Influences of ice-water mixture on the vertical water-entry of a cylinder at a low velocity. *Ocean Eng*, 2022, 256: 111464
- 17 Hu X, Wei Y, Wang C. Dynamic characteristics of polar ocean detector passing through the crushed ice zone based on the CFD-DEM method. *Int J Mech Sci*, 2024, 271: 109304
- 18 Hu X, Wei Y, Wang C. CFD-DEM analysis of oblique water entry under a polar environment. *Int J Mech Sci*, 2024, 278: 109480
- 19 Lu L, Yang S, Hu Y, et al. Experimental investigation on cavity evolution characteristics of structure passing through crushed ice area. *Ocean Eng*, 2025, 324: 120754
- 20 Lu L, Cheng Y, Chen K, et al. Experimental investigation on the water-entry characteristics of the structure passing through the broken ice field. *Ocean Eng*, 2024, 313: 119348
- 21 Cui W, Kong D, Sun T, et al. Coupling dynamic characteristics of high-speed water-entry projectile and ice sheet. *Ocean Eng*, 2023, 275: 114090
- 22 Huang Z G, Wang H, Cai X W, et al. Influence of velocity on the cavity flow characteristics of vertical ice-breaking water entry of a projectile (in Chinese). *Acta Armamentarii*, 2024, 45: 3371–3384 [黄振贵, 王浩, 蔡晓伟, 等. 速度对射弹垂直破冰入水空泡流动特性的影响. *兵工学报*, 2024, 45: 3371–3384]
- 23 Ren H, Zhao X. Numerical simulation for ice breaking and water entry of sphere. *Ocean Eng*, 2022, 243: 110198

- 24 Lu L, Li X, Yang Z, et al. Analysis of the influence of ice thickness on cavity evolution and motion characteristics of a cylinder during high-speed water entry. *Ocean Eng*, 2026, 354: 124951
- 25 Wu X, Lu L, Yang Z, et al. Experimental study on the cavity evolution characteristics of the cylinder passing through the ice plate. *Ocean Eng*, 2025, 339: 122093
- 26 Logvinovich G V. *Hydrodynamics of Free-Boundary Flows*. Jerusalem: IPST Press, 1972

Experimental study on cavity evolution characteristics of an inclined water-entry structure under different ice layer thicknesses

YANG Zhe, WANG Yihang, HUANG Zhengui^{*}, WANG Hao, WAN Jie & GUO Zeqing

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

**Corresponding author (email: hzgkeylab@njust.edu.cn)*

To investigate the influence of ice layers on the cavity evolution during structure water entry, this work conducts water-entry experiments of a structure penetrating ice layers of different thicknesses at a speed of 140 m/s and an entry angle of 30°, using high-speed photography. The influence of ice layer thickness on the cavity evolution process and ice layer fragmentation characteristics is systematically investigated, and the cavity evolution is divided into four stages: cavity expansion, cavity wall bending, cavity contraction, and cavity surface closure. The results show that ice layer thickness alters the cavity evolution process, and the cavity surface closure time advances continuously with increasing ice layer thickness. When the ice layer is thin, the cavity expands continuously with intense splashing. As the ice layer thickens, more initial kinetic energy of the structure is consumed in breaking the ice, resulting in a significant reduction in the radial expansion momentum transferred to the water. At the same time, the restraining effect of the ice wall intensifies, causing the cavity wall to experience wrinkling, bending, and contraction earlier, and eventually inducing surface closure. In particular, when the ice layer is sufficiently thick, the deflection of the structure causes its tail to collide with the cavity wall, generating a tail-slap cavity. The water-away side is dominated by blocky ice fragments, while the water-facing side is characterized mainly by radial cracks. As the ice layer thickness increases, the size of ice fragments decreases, and the number of radial cracks on the leading side shows a decreasing trend.

ice-breaking water entry, high-speed water entry, cavity evolution, ice layer thickness, ice breakage

doi: [10.1360/SSPMA-2026-0291](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2026-0291)