

航行体破冰出水过程的流固耦合动力学数值仿真

施瑶^{1,2}, 杨文正^{1,2}, 蓝立演^{1,2}, 高山^{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 无人水下载技术工信和信息化部重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘 要:研究航行体破冰出水过程的动力学特性,对提升其性能与保障极地任务安全具有重要的科学价值和工程意义。针对航行体破冰出水过程中复杂的浮冰破碎过程与冲击载荷动力学特性,建立基于 ALE 算法和罚函数接触算法的冰-航行体-水相互耦合作用的数值模拟方法,对不同发射速度和双航行体发射条件下的动力学特性进行研究,得到了航行体破冰出水时浮冰破碎特征与航行体载荷特性。研究表明,航行体破冰出水可分为 3 个阶段。航行体受力主要由流体作用力和碰撞力构成,碰撞力峰值可达 2 600 kN,流体作用力峰值为 1 400 kN。双航行体比单航行体破冰所受流体作用力降低 50%。发射速度提高,航行体速度衰减率逐渐下降,发射速度为 50 m/s 时,速度衰减率为 5.98%。研究结果可为极地环境航行体水下发射工程提供理论依据和技术支持。

关 键 词:航行体;破冰出水;出水载荷;流固耦合
中图分类号:TJ63 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2026)02-0279-09

随着近年来极地资源的开发与气候变化的不断加剧,极地环境下航行体水下发射的重要应用工程价值逐渐凸显。在极地地区复杂的环境下,航行体的发射和作业面临着新的挑战。航行体与浮冰的相互作用涉及流固耦合、结构响应、冰层破碎等复杂物理过程,具有高瞬态、强冲击、大变形等强烈的非线性特征,使得现有数值模型难以准确预测冰层破碎与航行体出水过程。

海冰与结构物之间的相互作用复杂多样,既包括静态冰载荷作用,也涉及动态冰破裂过程^[1-6]。由于实际海冰-航行体-水之间的相互作用具有高度非线性和多尺度耦合特征,实验研究不仅成本高、重复性差,而且在浮冰破碎、力传播路径、浮冰破坏机理等方面存在可观测性局限。因此近年来数值模拟成为破冰研究的主要手段。乐光明^[7]利用 ALE 方法考虑潜射导弹出水流固耦合效应,分析了不同出水状态对航行体出水姿态、载荷等的影响规律;史

收稿日期:2025-07-08
基金项目:国家自然科学基金(52171324,U21B2055,U2341285)资助
作者简介:施瑶(1988—),教授
通信作者:高山(1995—),助理研究员
e-mail:gaoshan111@mail.nwpu.edu.cn

兴隆等^[8]利用 ALE 方法建立高能破冰弹水下破冰动态响应模型,对破冰弹侵彻冰盖过程进行模拟,并在野外进行了相同当量药包的模拟破冰实验;魏洪亮等^[9]采用实验和仿真相结合的方式,模拟了航行体出筒、出水过程,提出了水下发射航行体跨介质动载荷预报方法;姬贺港等^[10]运用 S-ALE 流固耦合方法研究了圆柱直立结构和冰层之间的碰撞,发现柱体受的冰载荷与流场网格呈正相关;蔡晓伟等^[11]利用 ALE 方法建立细长体穿越冰水混合物的出水模型,分析了出水流场,建立了流场的数值预报方法;王英霖等^[12]通过 LS-DYNA 软件对高速弹体侵彻冰体过程进行模拟,得到了弹体和冰体在相互作用过程中的动态响应特性曲线;薛世超等^[13]基于实验对比分析了 MAT10 拉格朗日算法与 MAT155 的 SPH 算法,结果表明拉格朗日算法对于应力应变的模拟优于 SPH 算法,但是 SPH 算法对于冰模型的破坏形态模拟更接近实验结果;Cui 等^[14]使用弹塑性本构模型模拟海冰力学行为,基于 CEL 方法分析比较有冰和无冰环境下高速弹丸入水空泡的演变过程以及不同厚度冰层的裂纹发展情况;陈光茂等^[15]对楔形体入水问题进行了数值和实验研究,结果表明 SPH 方法在解决入水问题上有很好的准确性,入

水最大冲击力与楔形体斜升角的三次方呈正比,与入水速度的二次方呈正比;闫允鹤等^[16]基于 CFD-DEM 方法研究了潜艇在碎冰航道上浮出水过程的冰载荷,结果表明潜艇冰载荷主要集中在摇荡阶段,且冰载荷呈现分段集中的特征。

综上所述,目前对冰结构相互作用的数值模拟方法主要包括 CEL(耦合欧拉-拉格朗日)、ALE(任意拉格朗日-欧拉)、SPH(光滑粒子流体动力学)等。CEL 方法适用于高变形流体区域,但在处理界面复杂、固体破坏剧烈的问题时,网格畸变严重、耗时长,且对接触算法依赖较大。SPH 方法虽然无网格限制,适用于自由面或碎裂问题,但对初始粒子分布敏感、计算成本高,容易在固-液界面附近产生数值振荡,影响仿真精度。相比之下,ALE 法在流体域采用欧拉描述,在结构域用拉格朗日法,网格可以适当滑动,适用于大变形、接触和界面追踪等问题。其稳定性和精度都优于 CEL 和 SPH 方法,因而成为水-冰-结构耦合模拟中主流方法之一。

然而,已有研究中多数仅对冰层静态加载载荷或在理想条件下对单体冲击进行简化处理,对航行体实际破冰出水过程,尤其是在多种工程相关工况下的系统性建模研究仍较缺乏。本文基于任意拉格朗日-欧拉(ALE)算法与罚函数接触算法建立了冰-航行体-水相互耦合作用数值模拟方法,兼顾计算精度和计算效率。旨在通过建立高效的数值模型,系统研究多种关键因素对破冰出水动力学特性的影响规律,以获得航行体破冰出水的动力学变化规律与浮冰破碎特性,为极地环境航行体发射方案优化与结构设计提供全面的理论依据和技术支持。

1 理论与计算方法

1.1 ALE 算法

ALE(arbitrary Lagrangian-Eulerian)流固耦合算法^[17]常用于多种物质之间的相互耦合作用,其质量、动量及能量守恒方程如(1)式所示。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(\mathbf{V} - \mathbf{V}_g)) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 是流体密度; $\mathbf{V}$ 是流体速度; $\mathbf{V}_g$ 是网格速度。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \otimes (\mathbf{V} - \mathbf{V}_g)) = \\ - \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + f \end{aligned} \quad (2)$$

式中: p 是压力; $\boldsymbol{\sigma}$ 是应力张量; f 是体积力。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E(\mathbf{V} - \mathbf{V}_g)) = \\ - \nabla \cdot (\mathbf{V}p + q) + \mathbf{V} \cdot \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + f \cdot \mathbf{V} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: E 是总能量; q 是热流。

1.2 罚函数接触算法

罚函数接触算法^[18]对本文中的冰-航行体-水相互耦合作用问题有很好的适用性。对于 2 个接触体 A 和 B,假设其接触面上的节点分别为 i 和 j ,接触力可定义为

$$f_{ij} = k \cdot \delta_{ij} \quad (4)$$

式中: k 是接触刚度; δ_{ij} 是节点 i 和 j 之间的渗透深度。刚度 k 定义为

$$k = p_f \frac{KA^2}{V} \quad (5)$$

式中: p_f 是接触面刚度惩罚因子; K 是接触单元体积弹性模量; A 是接触段面积; V 是主段体积。

1.3 状态方程

本文中,水的状态方程采用 *EOS_GRUNEISEN 定义,压缩状态下材料的压力为

$$p_1 = \frac{\rho_0 C^2 u \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) u - \frac{a}{2} u^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1)u - S_2 \frac{u^2}{u+1} - S_3 \frac{u^3}{(u+1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + au)E \quad (6)$$

定义材料膨胀时的压力为

$$p_2 = \rho_0 C^2 u + (\gamma_0 + au)E \quad (7)$$

式中: C 为 u_s-u_p 曲线的截距; S_1, S_2, S_3 为 u_s-u_p 曲线斜率的系数; γ_0 为 GRUNEISEN 系数; a 为对 γ_0 的一阶体积修正; $u = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ 。

空气的状态方程采用 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 定义,介质中的压力为

$$p_3 = C_0 + C_1 u + C_2 u^2 + C_3 u^3 + (C_4 + C_5 u + C_6 u^2)E \quad (8)$$

式中: E 为单位体积内能; u 为相对体积; $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ 为常数; C_0 用于定义初始压力; C_1 是体积黏性。

1.4 航行体破冰有限元模型

破冰出水模型主要由冰层、水域、空气域以及航行体组成,其中水域、空气域深度可变,截面形状为正方形,如图 1 所示。本文主要研究航行体与浮冰碰撞过程,因此设定航行体与冰层初始距离为 0.1 m,浮冰为正方形结构,边长 1.6 m,厚度为

0.4 m。各部分网格均采用六面体网格,其中冰层、水域、空气域网格大小一致。水域和空气域各边界采用无反射边界条件,浮冰采用自由边界条件,航行体位于冰层中心正下方。

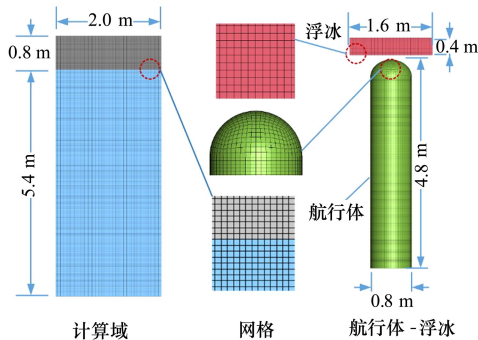


图 1 网格划分

整个计算模型采用 ALE 算法,其中水域和空气域采用欧拉方法描述,冰层和航行体采用拉格朗日方法描述;冰模型的本构方程为 MAT_ISOTROPIC_ELASTIC_FAILURE,航行体的本构模型采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC,通过 CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 关键字定义流固耦合关系,同时考虑航行体与冰层之间的侵蚀,通过 CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE 关键字定义航行体与冰层的接触关系,通过侵蚀接触实现冰裂纹的产生和扩展。通过 BOUNDARY_NON_REFLECTING 在水域和空气域的所有边界设置无反射边界条件。冰、航行体材料参数设置如无反射边界条件,浮冰采用自由边界条件,航行体位于冰层中心正下方。

如表 1~2^[19-20]所示,冰材料中设定了冰网格单元的失效数值,其中失效应变为 0.35,失效压强为 -4 MPa,航行体采用铝合金材质,模型简化为实心柱体。

表 1 冰模型参数^[19]

参数	数值
密度/(kg·m ⁻³)	910
剪切模量/GPa	2.2
屈服应力/MPa	2.12
塑性硬化模量/GPa	4.26
体积模量/GPa	5.26
塑性失效应变	0.35
失效压强/MPa	-4

表 2 航行体模型参数^[20]

参数	数值
尺寸/m	$D=0.8 \quad L=4.8$
密度/(kg·m ⁻³)	2 700
弹性模量/GPa	76.3
泊松比	0.33
屈服应力/GPa	0.275
切线模量/GPa	0.275

1.5 网格模型与数值方法验证

为了验证网格无关性,本节采用 2,3,4 cm 的全域均匀网格尺寸进行了对比。如图 2 所示,不同网格尺寸下碰撞力趋势基本一致,但 2 cm 网格的峰值略高,且提前出现一个小峰值。这是由于较小的网格尺寸能够更精确地捕捉局部应力集中和失效行为。网格尺寸为 3 cm 和 4 cm 时,碰撞力曲线吻合较好。在保证计算精度的前提下为节约计算时间,本文选用 3 cm 网格尺寸进行后续研究。

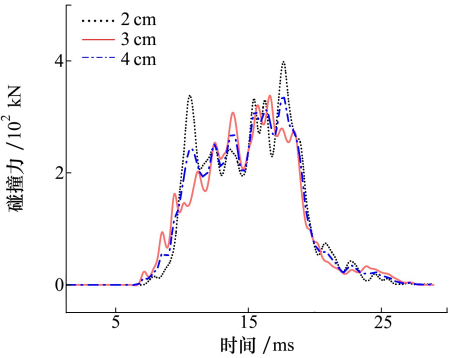


图 2 不同网格尺寸碰撞力曲线

同时为了验证所选用的本构模型模拟真实冰的准确性,本节还进行钢球撞击冰层数值仿真计算,并与 Zhang 等^[21]开展的实验进行对比。Zhang 等采用直径 15 mm 钢球开展了钢球冲击冰层实验,并根据一系列实验结果拟合了 6 mm 冰层厚度下冲击速度和剩余速度的关系曲线,表达式如(9)式所示。

$$V_r = 0.99V_i - 3.10 \tag{9}$$

建立钢球冲击冰层的数值计算模型如图 3 所示,开展了不同撞击速度工况计算,仿真中的相关条件设置均与实验保持一致。

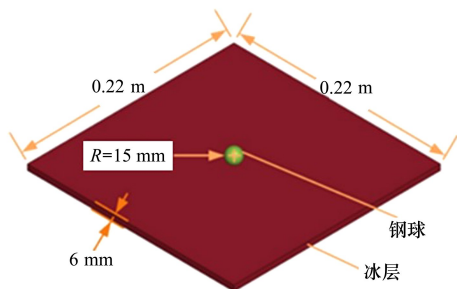


图3 钢球撞击冰层模型

如图4所示,仿真结果表明:在冲击作用下,冰层中心区域首先产生径向裂纹,随后逐渐扩展形成环向裂纹,最终出现多裂纹交织的破碎形态,该裂纹扩展模式与文献[21]实验结果吻合良好,验证了所采用的本构模型能够较为准确地反映冰在高速冲击下的裂纹产生与扩展规律。图5给出了数值计算、实验拟合曲线中初始速度、剩余速度对比结果,可以发现仿真与实验拟合曲线吻合较好。综上所述,采用该本构模型模拟冰时,对冰的裂纹扩展效果、碰撞剩余速度等都有较好的模拟效果,说明该本构模型可用来处理航行体-冰碰撞问题。

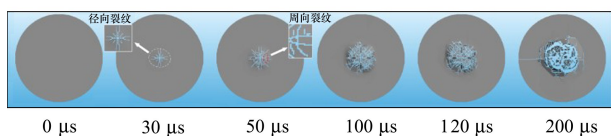


图4 裂纹扩展

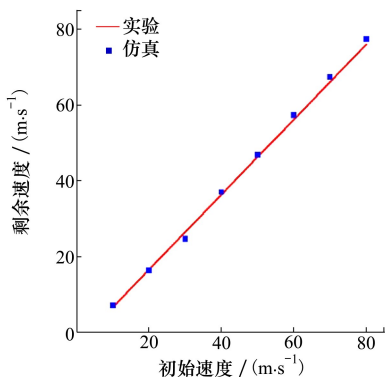


图5 初始速度-剩余速度关系对比

为验证数值方法的可靠性和有效性,还开展了与实验工况相同的数值仿真,其中浮冰尺寸为 $31\text{ cm}\times 31\text{ cm}\times 3\text{ cm}$,航行体出水速度为 14 m/s 。图6给出了航行体破冰出水后的实验和仿真对比图,可以发现本文数值方法对浮冰破碎的效果模拟较

好。同时对比了航行体速度衰减曲线,从图7中可以看出:仿真中碰撞前后航行体速度分别为 $13.45, 10.57\text{ m/s}$,速度衰减率为 21.41% ;实验中碰撞前后航行体速度分别为 $13.09, 10.73\text{ m/s}$,速度衰减率为 18.03% 。速度仿真结果与实验结果基本吻合。通过上述对比说明本文所建立的数值方法可行。

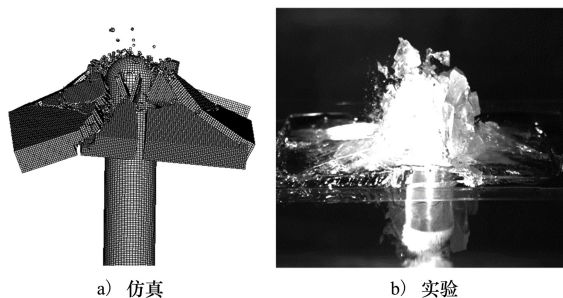


图6 破碎效果对比

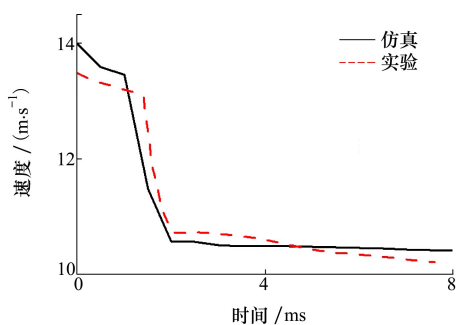


图7 航行体速度对比

2 仿真结果分析

2.1 航行体出水浮冰冲击破坏特性分析

基于理论分析和数值仿真方法,本节以浮冰尺寸 $4D\times 4D$ 、发射速度 30 m/s 工况为例,对航行体破冰出水过程中的图像、应力应变数据等进行详细分析。

航行体破冰出水运动过程如图8所示,整个运动过程可以分为3个阶段。第一阶段是碰撞前,航行体上升接近浮冰,冰层与航行体之间的水域受挤压产生水垫效应,形成了高压区,当压力达到浮冰单元的失效压力时,单元失效,浮冰开始产生裂纹。裂纹扩展时,先产生径向裂纹,再产生周向裂纹,且径向裂纹扩展速度大于周向裂纹。第二阶段是碰撞时,此时航行体受到的碰撞力也达到了峰值,随着航行体与浮冰的直接碰撞,产生裂纹的浮冰中心区域开始破碎成不同形状的碎冰块,远离中心处的浮冰

保留较完整。第三阶段是碰撞后,浮冰已被破坏,在航行体及其携带的水作用下,碎冰块持续上升、翻转并堆积在航行体周围。整个出水过程中伴随着细小

冰粒、水向四周飞溅的现象,期间航行体可能与破碎冰块发生二次碰撞。

图 9 为浮冰破碎应力变化情况,开始时,由于水垫效应的存在,浮冰中心位置应力最大。随着航行体上升,浮冰开始产生裂纹,中心高应力区域开始缩小,应力逐渐往四周传递,产生裂纹的区域开始出现高应力,碰撞后,高应力区域快速消失,仅冰层与航行体头部接触位置保持高应力。

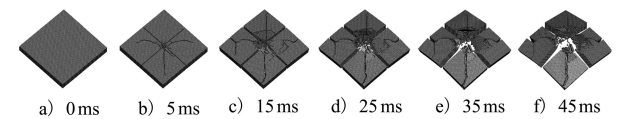


图 8 浮冰破碎过程

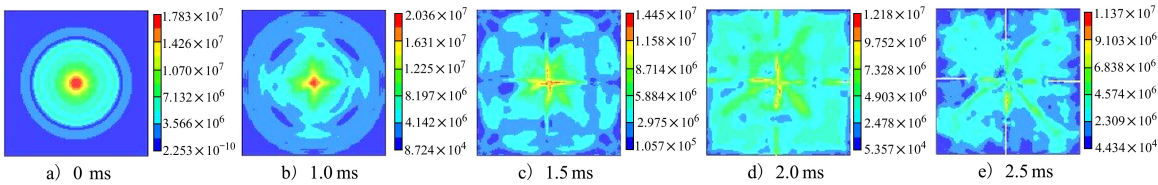


图 9 浮冰破碎应力变化

浮冰的存在会抑制航行体出水过程中水冢的生成与发展。图 10 给出了不同时刻无冰环境和有冰环境下水冢轮廓的变化过程。整体而言,浮冰情况下水冢高度要小于无冰环境,而宽度要大于无冰环境。无冰环境下,水冢轮廓更加对称,附着在航行体表面时间也更长。而浮冰环境下受到周围碎冰块的抑制,水冢轮廓有所差异,碎冰块下方的水冢轮廓受碎冰块影响较大。碎冰块上方的水冢轮廓受影响较小,轮廓更为匀称,浮冰的存在也会导致水冢脱落时刻更早。

达到峰值,约为 1 800 kN,峰值时刻约为 6 ms。随后浮冰破碎,碰撞力迅速减小。航行体携带碎冰块继续上升,期间与浮冰的相互碰撞力远小于前期,并逐渐减小至 0。流体作用力峰值约为 1 400 kN,峰值时刻约为 5 ms。其峰值要略提前于碰撞力峰值,流体作用力达到峰值时,碰撞力开始快速上升;碰撞力达到峰值后,流体作用力也衰减趋于平稳,其原因是碰撞前产生水垫效应,高压区域使流体对航行体作用力最大。当浮冰碰撞破碎时,碰撞力达到峰值,流体作用力即迅速下降。由此可知,在破冰出水过程中,航行体与浮冰即将碰撞时受到合力最大,此时最有可能对航行体造成危害。

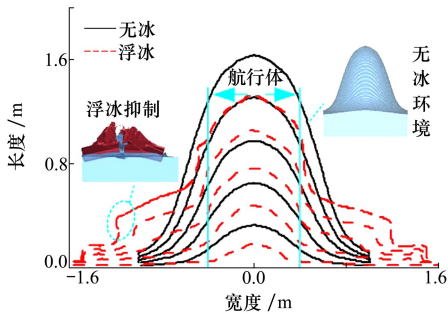


图 10 航行体出水水冢轮廓变化

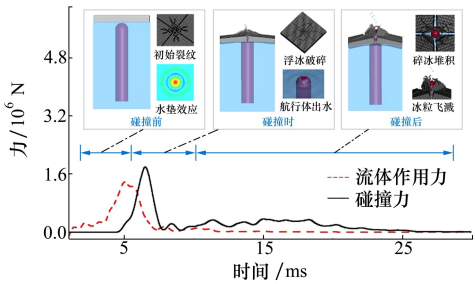


图 11 航行体受力曲线

2.2 浮冰环境航行体出水载荷分析

航行体出水过程中所受总载荷由碰撞力与流体作用力叠加而成。采用 LS-DYNA 中 CONTACT_FORCE_TRANSDUCER 记录接触力作为碰撞力,流体力由 ALE 区域内的流体压强积分获得。图 11 给出了航行体受到的碰撞力和流体作用力的变化。碰撞过程中,因浮冰单元失效,航行体经历了多次力的加载与卸载。航行体与浮冰接触瞬间,碰撞力迅速

图 12 给出了整个过程中航行体所受流体作用力和碰撞力叠加的情况。在 5~7 ms 左右,航行体受到流体作用力、碰撞力的持续作用,经历了较长时间的高载荷作用,该阶段对航行体壳体、内部结构、出水稳定性等影响较大;在 25 ms 之后,航行体已经完成了对浮冰的破碎,整体受力趋于稳定。

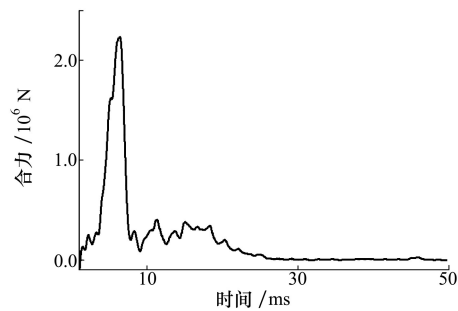


图 12 航行体合力曲线

2.3 单航行体与双航行体破冰出水对比

为了探究单航行体与双航行体出水破冰的差异性,从浮冰破碎、出水载荷、速度等方面对 2 种破冰出水情况进行了对比,其中航行体速度 $V=30\text{ m/s}$,浮冰尺寸 $6D\times 6D$,双航行体横向间距 $H=3D$ 。

图 13~14 展示了单、双航行体破冰时浮冰的破碎情况。单航行体碰撞位置在浮冰中心,对浮冰整体破坏程度更大。碰撞中心向四周产生径向裂纹与环向裂纹,4 条明显径向裂纹贯穿整块浮冰。双航行体破冰时,浮冰从 2 个碰撞中心区域产生裂纹破坏,出水位置靠近浮冰边缘,对水的抑制作用较弱,对浮冰破坏程度较小,远离碰撞中心区域破坏轻微。此外,两者存在 2 点显著区别:①双航行体破冰时无明显环向裂纹,但因 2 个碰撞位置作为支点受力,浮冰出现明显向内弯折;②单航行体破冰时,单块浮冰覆盖水面面积广,对水的抑制作用明显,导致航行体

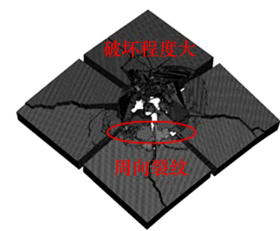


图 13 单体浮冰破碎

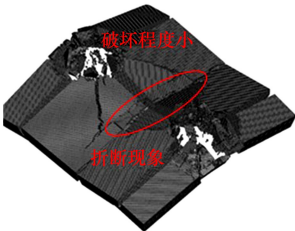


图 14 双体浮冰破碎

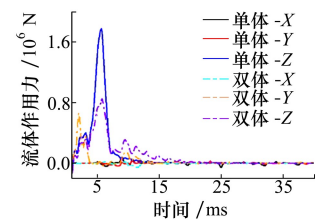


图 16 流体作用力分力对比

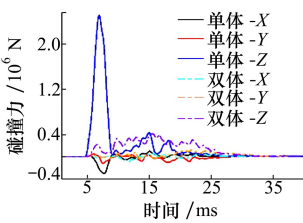


图 17 碰撞力分力对比

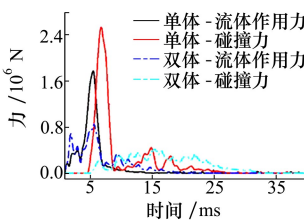


图 18 流体作用力碰撞力对比

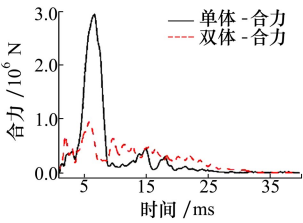


图 19 合力对比

单航行体碰撞力在各个方向均大于双航行体,其中 Z 方向的碰撞力最大,达到了 $2\,600\text{ kN}$,持续时

受力显著增加。

如图 15 所示,通过出水过程中双航行体与单航行体的速度变化对比发现,5 ms 前两者速度曲线基本重合,从 5 ms 开始单航行体速度衰减迅速,8 ms 左右开始更平缓地衰减,到 25 ms 后速度变化不明显,破冰后的速度约为 27.5 m/s 。而双航行体从 5~25 ms,速度始终平缓地衰减,衰减速率远小于单航行体,破冰后的速度约为 28 m/s 。从速度对比来看,双航行体出水速度变化平缓,破冰损失动能更小。

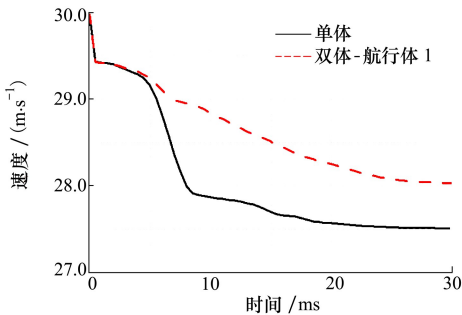


图 15 单航行体和双航行体出水过程速度对比

从载荷方面来看,单航行体破冰出水载荷远大于双航行体破冰出水载荷。图 16~19 从载荷构成、各方向分力、最终合力等方面对破冰载荷进行了对比。总的来看,航行体出水时,其受到的作用力主要分为 2 类:一类是流体作用力,另一类是碰撞力。从图 16 可知,2 种出水方式中都是 Z 方向的流体作用力最大,单航行体的 Z 向受力达到 $1\,800\text{ kN}$,约为双航行体的 2 倍。这也说明了单航行体出水时,浮冰对水的抑制作用更强,而 X,Y 方向的受力远小于 Z 方向。 X,Y 方向的受力对比则是双航行体出水更大,其中 Y 方向是两航行体横向间距的方向,这说明双航行体之间的相互影响会导致航行体受力增加,影响出水过程中的稳定性。

长约为 4 ms。2 种方式出水时, X,Y 方向的碰撞力都平稳变化,并且持续时间较长,约为 25 ms,最后

趋于 0,航行体在该阶段中完成了对浮冰的破碎并出水。对上述各分力求解得到合力,并最终得到出水总载荷,可以发现双航行体破冰出水时受力要远小于单航行体破冰出水。

2.4 发射速度对航行体破冰出水影响

为探究发射速度对航行体破冰出水过程影响,本节设置了发射速度范围为 0~50 m/s 的航行体破冰出水工况,如表 3 所示。

表 3 发射速度工况

工况	发射速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	浮冰尺寸
1	10	4D×4D
2	20	4D×4D
3	30	4D×4D
4	40	4D×4D
5	50	4D×4D

图 20 展示了不同发射速度下,航行体速度变化曲线,航行体速度曲线均在与浮冰直接碰撞时衰减迅速,破碎后速度变化较小。不同情况下的速度衰减率计算结果如表 4 所示,可以发现,随着发射速度提高,速度衰减值增加,但整体的衰减率在减小。航行体发射速度高时,碰撞瞬间会损耗更高的速度值,但由于发射速度高,衰减率反而会更小。

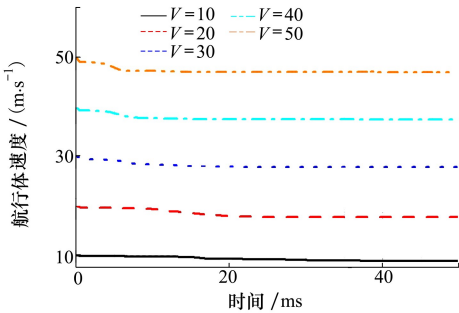


图 20 不同发射速度下航行体剩余速度历时曲线

表 4 速度衰减

发射速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	剩余速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	衰减值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	衰减率/%
10	8.815 82	1.184 18	11.841 80
20	17.683 16	2.316 84	11.584 20
30	27.777 39	2.222 61	7.408 72
40	37.470 65	2.529 35	6.323 38
50	47.009 63	2.990 37	5.980 74

图 21~22 给出了不同发射速度下航行体所受

碰撞力、流体作用力对比。从图 21~22 中可以发现随着发射速度提高,流体作用力以及碰撞力均有所增加。当速度小于 30 m/s,两者均出现多个峰值,而发射速度大于 30 m/s 时,只会出现一个明显的峰值。碰撞力与流体作用力数量级相当,碰撞力峰值约为流体作用力的 2 倍。随发射速度增加,峰值脉宽减小,航行体在更短时间内承受更大作用力,表明发射速度增大会加剧航行体破坏风险。在航行体以 30~50 m/s 速度破冰出水过程中,局部流场可能出现瞬态低压区,从而诱发空化现象。已有研究^[22]表明,该速度范围内空化气泡主要分布于航行体表面局部区域,对流体压力峰值及航行体受力影响较小。本文数值模型聚焦于航行体强流固耦合作用及浮冰大变形破碎过程,故未引入空化模型。

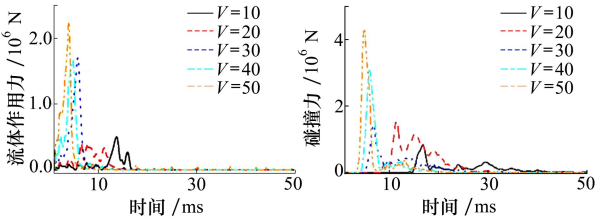


图 21 流体作用力对比 图 22 碰撞力对比

3 结 论

针对航行体破冰出水的应用背景,本文基于 LS-DYNA 软件,采用 ALE 算法与罚函数接触算法建立了航行体-浮冰-水耦合作用的破冰出水数值模型,分析了浮冰破坏特性与航行体破冰载荷,获得了动力学载荷特性与作用机理,并探究了发射速度与双航行体发射等因素的影响规律。主要结论如下:

航行体破冰出水可分为 3 个阶段:碰撞前形成高压区、碰撞产生裂纹与破碎、碰撞后碎冰翻转堆积。浮冰裂纹以径向裂纹为主,径向裂纹先于周向裂纹发展。航行体出水载荷由碰撞力与流体作用力组成,前者源于航行体与浮冰直接接触,后者由水流扰动产生。流体作用力峰值略早于碰撞力,航行体即将接触浮冰时总载荷达到峰值。相较单航行体,双航行体破冰载荷显著降低,其碰撞力峰值仅为单航行体的 50%,且双航行体破冰主要以弯折破坏浮冰。单航行体发射速度提高可降低破冰过程中的速度衰减率。当发射速度 50 m/s 时,速度衰减率为 5.98%,远低于 10 m/s 时的 11.84%。但较高速度会

增加破冰载荷,流体作用力与碰撞力随之增大。当速度超过 30 m/s,力的峰值脉宽减小,作用时间缩短。

本文通过理论分析和数值模拟,系统研究了航

行体破冰出水过程的动力学特性,采用 ALE 方法的航行体破冰数值仿真模型为极地环境航行体水下发射工程提供了科学依据,可为极地资源开发、极地航行技术及相关工程设计提供理论指导。

参考文献:

- [1] 张健,王祥,姬贺港,等.基于粘聚单元的层冰-海洋平台碰撞数值模拟[J].舰船科学技术,2023,45(19):99-103.
ZHANG Jian, WANG Xiang, JI Hegang, et al. Numerical simulation of layer ice-ocean platform collision based on cohesive elements[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(19): 99-103. (in Chinese)
- [2] 贡力,董洲全,杨腾腾,等.水介质中冰-桥墩碰撞动力响应分析[J].振动与冲击,2024,43(11):72-82.
GONG Li, DONG Zhouquan, YANG Tengting, et al. Dynamic response analysis of ice-pier collision in water medium[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(11): 72-82. (in Chinese)
- [3] TIPPMANN J D, KIM H, RHYMER J D. Experimentally validated strain rate dependent material model for spherical ice impact simulation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 57: 43-54.
- [4] KJERSTAD Ø K, LU W, SKJETNE R, et al. A method for real-time estimation of full-scale global ice loads on floating structures[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 156: 44-60.
- [5] KRAUS E I, MELNIKOV A Y, FOMIN V M, et al. Penetration of steel projectiles through finite-thickness ice targets[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2019, 60: 526-532.
- [6] LAUSCH M, REITTER L M, SCHREMB M, et al. Impact of an ice particle onto a rigid substrate: Statistical analysis of the fragment size distribution[J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 181: 104732.
- [7] 乐光明.潜射导弹出水姿态与载荷特性分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
LE Guangming. Analysis of water-exit attitude and load characteristics of submarine-launched missiles[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [8] 史兴隆,王呼和,佟铮.高能破冰弹水下破冰过程数值模拟[J].爆破器材,2014,43(6):53-56.
SHI Xinglong, WANG Huhe, TONG Zheng. Numerical simulation of underwater ice-breaking process of high-energy ice-breaking projectile[J]. Blasting Equipment, 2014, 43(6): 53-56. (in Chinese)
- [9] 魏洪亮,陆宏志,赵静,等.水下发射航行体跨介质动态载荷预报研究[J].导弹与航天运载技术,2016(2):77-80.
WEI Hongliang, LU Hongzhi, ZHAO Jing, et al. Research on prediction of cross-medium dynamic loads of underwater launched vehicles[J]. Missiles and Space Launch Technology, 2016(2): 77-80. (in Chinese)
- [10] 姬贺港,张健,李越.基于黏聚单元法的冰-柱碰撞流固耦合计算方法研究[J].振动与冲击,2023,42(11):42-47.
JI Hegang, ZHANG Jian, LI Yue. Study on fluid-solid coupling calculation method for ice-column collision based on cohesive element method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(11): 42-47. (in Chinese)
- [11] 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(增刊1):79-90.
CAI Xiaowei, XUAN Jianming, WANG Baoshou, et al. Numerical simulation of the outflow field of a slender body crossing ice-water mixture[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(suppl.1): 79-90. (in Chinese)
- [12] 王英霖,王健,诸庆生.高速弹体侵入冰材料过程数值模拟研究[J].兵器装备工程学报,2021,42(4):62-67.
WANG Yinglin, WANG Jian, ZHU Qingsheng. Numerical simulation of high-speed projectile penetration into ice material[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(4): 62-67. (in Chinese)
- [13] 薛世超,常孟周,韩雅菲,等.冲击载荷下冰的动态压缩力学特性数值模拟[J].装备制造技术,2021(3):4-6.
XUE Shichao, CHANG Mengzhou, HAN Yafei, et al. Numerical simulation of dynamic compressive mechanical properties of ice under impact loading[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2021(3): 4-6. (in Chinese)
- [14] CUI W, KONG D, SUN T, et al. Coupling dynamic characteristics of high-speed water-entry projectile and ice sheet[J]. Ocean Engineering, 2023, 275: 114090.
- [15] 陈光茂,郑小波,毋晓妮,等.二维楔形体入水问题的数值和实验研究[J].舰船科学技术,2021,43(1):53-60.
CHEN Guangmao, ZHENG Xiaobo, WU Xiaoni, et al. Numerical and experimental study on the water entry problem of a two-dimensional wedge[J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(1): 53-60. (in Chinese)
- [16] 闫允鹤,石玉云,李志富.极地碎冰航道内潜艇上浮冰载荷特性研究[J].中国造船,2023,64(2):164-174.
YAN Yunhe, SHI Yuyun, LI Zhifu. Study on ice load characteristics of submarine surfacing in polar broken ice channel[J]. Shipbuilding of China, 2023, 64(2): 164-174. (in Chinese)
- [17] 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南[M].北京:兵器工业出版社,2003:25-30.
ZHAO Haio. LS-DYNA dynamic analysis guide[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2003: 25-30. (in Chinese)
- [18] 王泽鹏,胡仁喜,康士廷. ANSYS 13.0/LS-DYNA 非线性有限元分析实例指导教程[M].北京:机械工业出版社,2011:36-40.

WANG Zepeng, HU Renxi, KANG Shiting. ANSYS 13.0/LS-DYNA nonlinear finite element analysis tutorial with examples[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011: 36-40. (in Chinese)

[19] 杨晨. 水下航行体出水冲击谱及非线性动力分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.

YANG Chen. Water exit impact spectrum and nonlinear dynamic analysis of underwater vehicles[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)

[20] 辛春亮, 薛再清, 涂建, 等. 有限元分析常用材料参数手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020: 105-107.

XIN Chunliang, XUE Zaiqing, TU Jian, et al. Handbook of common material parameters for finite element analysis[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2020: 105-107. (in Chinese)

[21] ZHANG Y, LIU R, YUAN L, et al. Ice breaking by low-velocity impact with a rigid sphere[J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 182: 104786.

[22] ZHANG S, LIN W, XU H, et al. Dynamic characteristics of an underwater ventilated vehicle exiting water in an environment with scattered ice floes[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(11): 2046.

The fluid-structure interaction dynamic numerical simulation of the ice-breaking and water-exit process of the underwater vehicle

SHI Yao^{1,2}, YANG Wenzheng^{1,2}, LAN Liyan^{1,2}, GAO Shan^{1,2}

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

Abstract: Studying the dynamic characteristics of the vehicle during the water-exit process through ice-breaking has significant scientific value and engineering significance for improving its performance and ensuring the safety of polar missions. Focusing on the dynamic characteristics of ice fragmentation and impact loads during the water-exit process of a vehicle breaking through ice, this paper establishes a numerical simulation method for the ice-vehicle-water coupling interaction based on the ALE algorithm and the penalty function contact algorithm. The dynamic characteristics under different launch velocities and dual-vehicle launch conditions are investigated, and the ice fragmentation characteristics and vehicle load characteristics during the water-exit process are obtained. The research results show that the water-exit process of the vehicle breaking through ice can be divided into three stages. The load on the vehicle mainly consists of fluid force and contact force, with the peak contact force reaching 2 600 kN and the peak fluid force reaching 1 400 kN. The fluid force on the dual-vehicle configuration is reduced by 50% compared with that on the single-vehicle configuration during ice-breaking. As the launch velocity increases, the velocity decay rate of the vehicle gradually decreases. When the launch velocity is 50 m/s, the velocity decay rate is 5.98%. The research results can provide theoretical basis and technical support for underwater launch engineering of vehicles in polar environments.

Keywords: vehicle; water-exit through ice; water-exit load; fluid-structure interaction

引用格式:施瑶, 杨文正, 蓝立演, 等. 航行体破冰出水过程的流固耦合动力学数值仿真[J]. 西北工业大学学报, 2026, 44 (2): 279-287.

SHI Yao, YANG Wenzheng, LAN Liyan, et al. The fluid-structure interaction dynamic numerical simulation of the ice-breaking and water-exit process of the underwater vehicle[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2026, 44 (2): 279-287. (in Chinese)