

DOI: 10.11858/gywlxb.20261161

高速弹体跨冰入水冲击荷载及冰盖破坏特性

苏浩文, 郭子涛, 蔺永康, 卢普炎, 沈艾佳

(云南农业大学建筑工程学院, 云南 昆明 650201)

摘 要: 极地冰区条件下, 航行体跨冰入水过程涉及冰盖断裂、冰碎片飞溅、弹体进入水中后的空泡形成以及流场扰动, 构成典型的多介质耦合动力学问题。与传统通过自由水面的入水方式相比, 冰层的存在会改变航行体入水前的运动状态和荷载分布模式, 并对后续水下空泡形态及流场分布产生显著影响。为揭示弹体在破冰水体侵入过程中的动力响应特性, 本研究针对不同弹体头型及冰层厚度条件进行了数值模拟, 重点分析了跨冰入水冲击荷载、冰裂纹扩展、冰片飞溅以及入水后空泡演化等特性。结果表明: 弹体头型显著影响弹-冰接触方式及能量传递过程, 随着头型由平头向卵形头逐渐尖锐化, 冰层内高应力区和破坏范围逐渐向侵彻通道附近集中, 冰盖破坏由整体弯曲、径向裂纹扩展和强烈碎冰飞溅逐渐转变为局部压碎与穿孔; 同时, 弹体轴向加速度峰值及频谱幅值逐渐降低, 高频成分减弱, 冲击荷载由强瞬态加载向平缓连续加载过渡。随着冰层厚度增加, 冰盖刚度与局部承载能力增强, 裂纹扩展和碎冰飞溅受到抑制, 弹体速度与动能衰减加剧, 轴向加速度峰值及作用持续时间增大。弹体入水后, 平头弹形成的空泡径向尺度和自由液面扰动最大, 卵形弹形成的空泡最为细长, 但在中厚冰和厚冰条件下更易出现空泡偏转和流场不对称; 随着冰层厚度增加, 空泡尺寸及压力波传播范围均减小, 尾部闭合提前。研究结果可为极区跨介质航行体的结构设计与安全性评估提供重要参考。

关键词: 跨冰入水; 荷载特性; 冰盖破坏; 裂纹演化; 流场演化

中图分类号: O347.1

文献标识码: A

极地冰区环境下的航行体跨介质运动问题广泛存在于极地海洋工程、水下装备投放、冰区探测及跨介质航行器设计等领域^[1-5]。与开放水域环境下的入水过程相比, 跨冰入水首先涉及航行体-冰盖间的高速碰撞^[6], 继而引发冰盖出现局部压碎、裂纹扩展和碎冰飞溅^[7]等现象, 最后进入水体诱发空泡形成、压力波传播、气-水-冰多相耦合及复杂流场演化^[8]。所以, 跨冰入水过程并非单一的自由液面冲击问题, 其所涉及的冰盖破坏模式与航行体荷载特性直接影响航行体的穿透能力、运动稳定性及结构安全。因此, 开展高速航行体跨冰入水荷载及冰盖破坏特性研究, 可以深入揭示冰层如何影响航行体跨冰入水行为及水下运动机制, 对相关装备设计具有重要的工程应用价值与学术意义。

现有研究已从冰层破坏、空泡演化及冰水耦合等角度对跨冰入水特性展开了探索^[9]。冰作为典型脆性材料, 其高速冲击破坏通常表现为中心局部损伤^[10]、径向裂纹扩展、环向裂纹生成^[11]、碎块分离和局部穿孔等多种形式^[12]。在冰盖破坏模式方面, 冰层厚度是关键控制因素^[13]。薄冰在冲击作用下更容易产生整体弯曲变形和多径向裂纹扩展^[14]; 随着冰层厚度增加, 冰盖抗弯刚度与局部承载能力提高, 裂纹扩展受到抑制, 破坏模式转向中心压碎、局部穿孔和有限损伤^[12-14]。Ren 和 Zhao^[6]通过对球体破冰入水数值模拟指出冰层条件会改变球体运动和冲击荷载; Cui 等^[7]通过对高速入水弹体与冰盖耦合动力学的数值仿真, 分析了冰厚等因素对冰层破坏、弹体荷载和运动响应的影响。对于高速细长航行体, 头型是改变入水荷载^[15]与运动响应^[16]的主要影响因素, 但已有研究

收稿日期: 2026-09-07; 修回日期: 2026-09-22

基金项目: 国家自然科学基金 (1256020128)

第一作者: 苏浩文 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事入水冲击研究. E-mail: suhaowen2000@hotmail.com

通讯作者: 郭子涛 (1979—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事入水动力学研究. E-mail:

guozitao@hotmail.com

多集中于开放水域^[17-19]。在跨冰入水问题中, 头型的影响还主要体现在冲击冰盖阶段的接触方式^[20]、应力传播路径和裂纹演化过程的不同^[21], 但目前国内外开展的研究对完整冰层被不同头型弹体直接击穿后的冰层破坏模式、裂纹演化路径及碎冰飞溅特征等问题关注不足; 同时, 对于航行体高速跨介质入水问题, 单纯依靠荷载时域峰值难以完整表征冲击过程中的瞬态波动和频率组成^[22], 对于航行体加速度荷载的时频域表征^[23]、不同头型在跨冰入水条件下如何改变冰层能量转化、应力分布与刚体加速度频域特征之间的关联方面, 仍缺乏系统比较。在跨冰入水流场演化方面, 冰层覆盖条件显著制约着空泡发展。与开放水域不同, 跨冰入水时空泡上部受到冰层破孔、碎冰和冰水交界面的共同约束^[3-4,8]。针对冰孔约束入水情况, Hu 等^[24]和 Lu 等^[25]发现冰孔会抑制空泡扩张、促进提前闭合; Yuan 等^[26]进一步表明冰缝间距改变三维空泡形态。此外, 碎冰^[27]与浮冰碰撞^[28]通过瞬态能量交换^[29]强化了对空泡和运动响应的影响^[30]。上述研究揭示了跨冰入水过程中, 冰层几何形态与约束条件对冰层破坏及流场的影响机制, 但大多聚焦于单一头型、冰厚、孔径或浮冰布局, 对弹体自身外形不同而诱导的冰盖破坏模式与荷载耦合特性差异研究还相对较少。

基于此, 本文选取平头、半球头及卵形刚性弹体作为研究对象, 基于 ABAQUS-CEL 流固耦合数值方法系统分析了其不同冰厚条件下的跨冰入水过程。通过研究不同头型弹体撞击下的冰层裂纹扩展、应力分布、冰层观测点压力时程特性以及弹体轴向加速度时频域特性, 揭示不同头型和冰厚对冰盖破坏模式以及弹体冲击荷载特性的影响规律。在此基础上, 进一步分析冰层破坏、流场演化与刚体运动响应之间的关联特性。与已有研究相比, 本文突出完整冰盖在弹体高速冲击下的破坏模式、裂纹演化及其对后续跨冰入水过程的控制作用, 研究结果可为极区跨介质航行体结构设计、安全性评估以及冰-水-弹体多相耦合等相关问题提供参考, 具有重要的科学意义和工程应用价值。

1 数值计算模型及参数设置

为准确地捕捉弹体跨冰入水中涉及的弹-冰-水-气多相耦合及流场演化过程, 采用 Abaqus-CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian) 流固耦合方法构建了弹体跨冰入水动力学模型。

1.1 弹体模型

本文选取的三种典型弹体头型分别是平头、半球头形及卵形头, 其中卵形头定义 $CRH=3$, 其中卵型头采用弹头曲径比 (CRH) 进行几何定义, 本文取 $CRH=3$ 。如图 1 所示。所有弹体直径 D_0 均为 12.65 mm, 总长均为 75.9 mm, 平均质量控制在 70 ± 4 g。弹体模型均设置为实心并对其施加刚性约束。网格划分类别为 C3D8R, 所有弹体初速度均设置为 100 m/s, 初始位置保持弹头距冰层 10 mm 处垂直冰面入射。弹体材料为 45#钢, 材料参数见表 1。



图 1 弹体头型及网格划分

Fig.1 Projectile nose configurations and mesh division

表 1 弹体材料属性

Table 1 Properties of Projectile Materials

Material	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio
45#Steel	7850	210	0.29

1.2 欧拉域参数设置

计算模型中, 欧拉域上部填充空气材料, 高度设定为 $15D_0$, 下部水域的深度设定为 $50D_0$ 。为保证射弹入水后空泡扩张、自由液面扰动及局部流场演化等不被边界效应影响的同时兼顾计算效率, 将欧拉域直径设计为 $40D_0$ 。此外, 为减弱有限边界对计算结果的影响, 欧拉域四周均施加无反射边界条件实现对无限流场环境的近似模拟。

初始压力条件中, 水域上方赋予标准大气压, 内部则施加随水深逐渐增大的静水压力, 以反映实际环境中的压力分布特征; 同时, 重力加速度取 9.81 m/s^2 , 方向竖直向下。欧拉域网格采用

EC3D8R 类型，并对射弹运动区域内的欧拉网格实施局部加密，以提高对气液界面演化、空泡形成与发展以及局部流动细节的捕捉能力。相关模型设置和静水压力分布见图 2。

为准确捕捉流体域的动力学演化，本研究引入状态方程（EOS）对水与空气的体积行为进行精细描述。水相建模：采用式(1)所示的基于线性 Us-Up Hugoniot 关系的 Mie-Gruneisen 状态方程表征水的压缩性。

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m \quad (1)$$

其中， $\eta = 1 - \rho_0 / \rho$ 表示流体的压缩状态，水的初始密度 $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ ，水中声速 $c_0 = 1450 \text{ m/s}$ ， $s = 0$ ， Γ_0 表示 Grüneisen 系数， E_m 为单位质量内能。

空气相采用理想气体状态方程（Ideal Gas EOS），以表征气体的压力演化特征。其表达式为：

$$p + p_A = (\gamma - 1) \rho_g E_m \quad (2)$$

上式中： γ 为气体的绝热指数，取值为 1.4； ρ_g 代表空气的初始密度，设定为 $1.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ； p_A 为参考的环境大气压力，取标准值 $1.0133 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

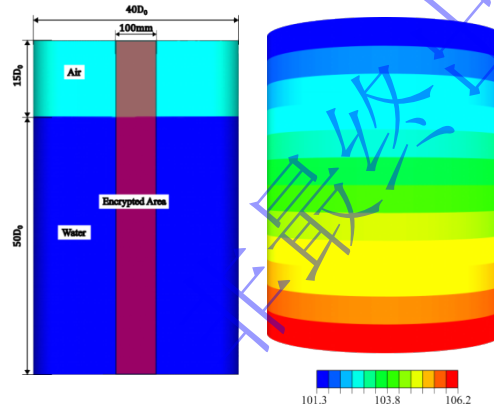


图 2 (a) 欧拉域设置 (b) 静水压力分布 (Pa)

Fig.2 (a) Configuration of the Eulerian domain (b) Hydrostatic pressure distribution(Pa)

1.3 冰材料参数设置

冰在高速冲击下的破坏形式一般较为复杂，本文将冰材料视为与应变率相关的弹塑性脆性材料，采用弹塑性本构表征其力学行为。受压阶段通过应变率相关屈服强度描述其强化行为^[31]，并采用最大抗拉强度准则作为冰材料的失效准则，当应力超过最大抗拉强度时，脆性冰出现断裂破坏，相关失效单元删除。对于冰材料的具体数值如表 2 和表 3 所示。

表 2 冰材料属性^[31]

Table 2 Properties of Ice Materials^[31]

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio	Yield strength/MPa	Tensile stress/MPa
900	9.38	0.33	5.2	0.517

表 3 应变率相关屈服强度^[31]

Table3 Strain rate dependent yield strength^[31]

Strain rate(s-1)	Yield strength ratio
0(quasi-static)	1
0.1	1.01

0.5	1.50
1	1.71
5	2.20
10	2.42
50	2.91
100	3.13
500	3.62
1×10^3	3.84
5×10^3	4.33
1×10^4	4.55
5×10^4	5.04
1×10^5	5.25
5×10^5	5.75
1×10^6	5.96

关于冰层厚度的分类，一般根据应力波从接触面传播到冰板背面所需时间来定义，应力波在弹体内部来回传播一次，其在冰板内沿厚度方向来回传播的次数如下式：

$$n = \frac{c_t}{c_p} \cdot \frac{l}{h} = \frac{c_t}{c_p} \cdot \frac{l/d}{h/d} = \frac{c_t}{c_p} \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda_t} \quad 3(3)$$

式中 c_t 、 c_p 分别表示冰和弹材料中应力波传播速度， $c_t=4000$ m/s， $c_p=5100$ m/s； l 为弹长度； h 为冰层厚度； d 表示弹体直径； λ_p 表示弹体长径比； λ_t 表示相对靶厚。

当 $n>5$ 时，目标靶板内的应力逐渐达到稳定，可认为是薄靶； $5>n>1$ 时是中厚靶，此时，靶板背面的影响已经存在，但应力尚未稳定； $n<1$ 时，应力波从靶板背面反射回来所需时间大于弹体本身应力波的折返时间，靶板为厚靶。

依据以上原则分别设置冰层厚度为薄冰 10 mm、中厚冰 30 mm 及厚冰 50 mm，冰盖网格划分示意图如图 3 所示，在冲击中心部位设置加密区域，普通区网格密度为 3 mm，加密区网格密度为 2 mm。冰材料模型网格类型设置为 C3D8R，所有冰盖直径均为 $40D_0$ 。同时，为模拟自然条件下冰层覆盖方式，冰层不设置额外边界条件限制，漂浮在自由液面上方。

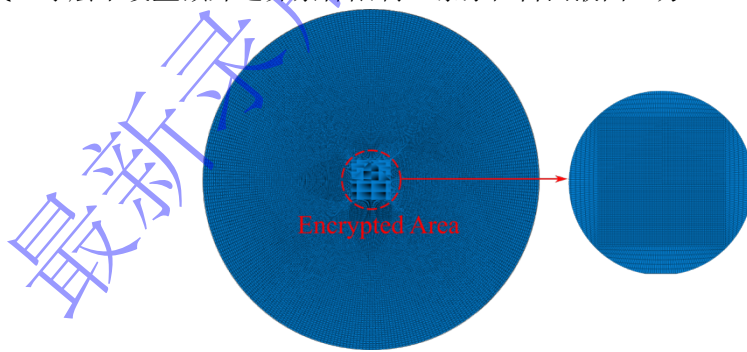


图 3 冰盖网格划分示意图

Fig.3 Schematic of the mesh division for the ice cover

1.4 数值模拟方法验证

为验证跨冰入水仿真的正确性，本文对欧拉域中水体、空气相及冰材料模型与文献实验结果进行了对比验证。

1.4.1 欧拉域模型参数验证

仿真结果与文献^[32]实验结果对比如图 4 所示。仿真过程中设置欧拉域全局尺寸为 3 mm，弹道中心区域加密为 2mm，弹体的网格密度为 2mm，欧拉与拉格朗日最小网格尺寸比值为 1。由结果

可见,不同头型弹体入水后自由液面扰动、空泡形态及弹道稳定性差异均得到了较好还原。平头弹入水后弹道稳定性强,空泡尺度较大;半球头弹侵彻过程形成空泡更为细长。仿真与实验结果基本一致,表明所建立模型能够较好地捕捉不同头型弹体入水过程中的主要物理特征。另外,通过图5中仿真模拟平头弹侵彻深度随时间的变化与实验数据的比较,可以发现在整个计算时程内,仿真与实验结果趋势相同,均表现为侵彻深度随时间近似线性增加。仿真结果在入水初期略高于实验值,中期与实验结果吻合较好,后期则略低于实验结果。至2.0 ms时,仿真值与实验值之间的相对误差约为8%,表明二者在数值上保持了较高的一致性。综上,所建立的数值模型不仅能够较好重现实验中位移响应的整体变化趋势,而且在响应幅值上也具有较好的预测精度,因此可认为该欧拉域模型具有良好的适用性。

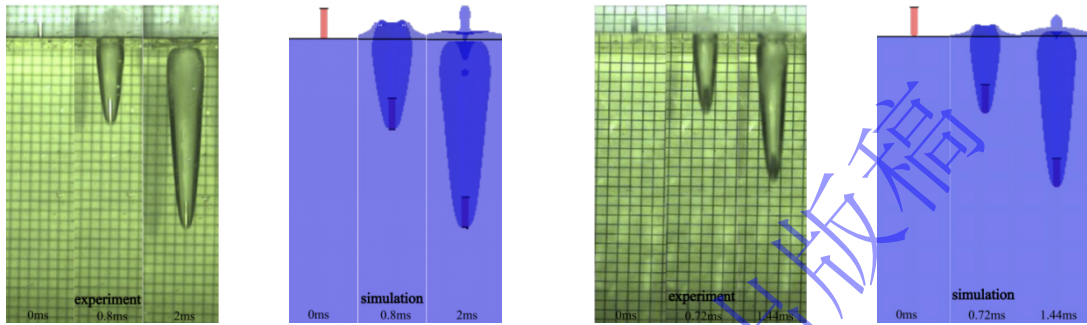


图4 平头(左)和半球头弹(右)入水过程实验^[32]与数值模拟对比

Fig.4 Comparison of the experimental water entry process of flat-head (left) and hemispherical head (right)^[32] with numerical simulation

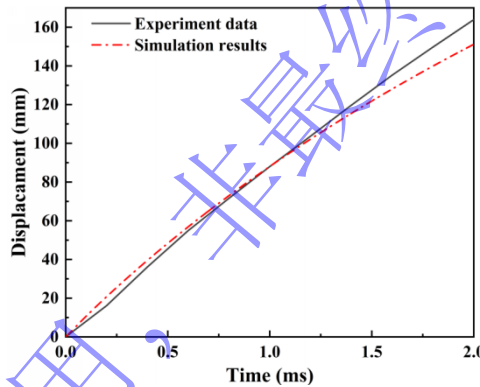


图5 实验^[32]与数值模拟中平头弹侵彻深度随时间变化

Fig.5 Comparison of the penetration depth-time histories for a flat-nosed projectile water entry between experiment^[32] and simulation

1.4.2 冰体模型参数验证

文献^[31]通过系列撞击实验讨论了冰材料抗压强度的应变率相关性,最终通过实验数据开发出一种应变率敏感的冰材料模型。为了验证冰材料模型有效性,建立图6所示的验证模型,其中冰球模型参考 Tippmann 文中实验 DS2-159(初速度 60.6 m/s,直径 50.8 mm)工况,并建立尺寸为 100 mm 的刚性方形板模拟实验中的测力杆,设置冰球最小网格尺寸为 1 mm,刚性板最小网格尺寸为 2 mm。实验中不同时刻冰球裂纹扩展情况如图7所示,14 μ s 时冰球底部发生碰撞,产生碎裂区,之后裂纹逐渐扩展,对比主裂纹扩展情况仿真与实验结果基本吻合。同时,提取计算过程中刚性板的轴向受力情况与实验中测力杆数据对比如图8所示。由图可见,仿真与实验结果在冲击荷载的整体演化规律上基本一致,趋势上均呈现快速上升、达到峰值后逐渐衰减的变化特征,说明数值模型能较好捕捉冰材料冲击过程的主要力学响应。实验数据峰值约为 14 kN,出现在 53 μ s 时刻;仿真结果峰值约为 13 kN,相较于实验数据峰值略低且出现时间延后。初始阶段仿真数据曲线波动更明显,中段荷载衰减略快于实验结果,后期两者总体吻合较好。尽管仿真结果在峰值及局部波动特征上与实验结果存在差异,但在峰值量级、时程变化趋势及衰减规律方面与实验结果具有较好一致性,证明了冰模型参数的可靠性。

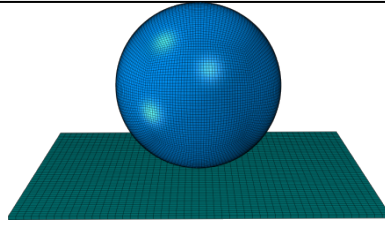


图 6 冰球验证模型

Fig.6 Validation model for the ice sphere

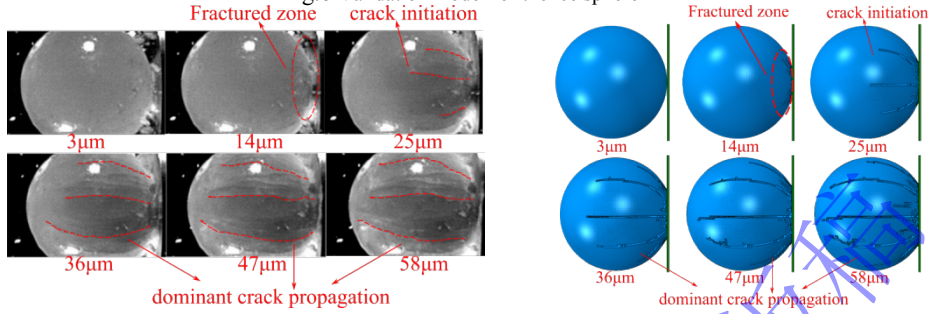


图 7 冰球裂纹演化实验（左）^[31]与数值仿真（右）对比

Fig.7 Comparison between the ice-sphere crack evolution (left) ^[31] and the numerical simulation (right)

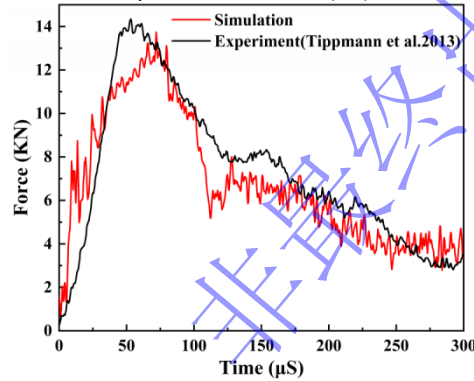


图 8 轴向力对比

Fig.8 Comparison of axial force

1. 4. 3 网格无关性验证

为排除网格密度对计算结果精确度的干扰，取卵形弹在 100 m/s 速度下破冰入水过程为例，设置加速度采样频率为 1 MHz，不对原始数据进行滤波处理保证峰值的准确性。按照以上设置对数值计算过程中的网格无关性进行验证。首先对弹-冰模型进行分析，保持弹体网格尺寸为 2 mm，分别改变冰层最小网格尺寸为 2.5 mm、2 mm 和 1.5 mm，验证弹体轴向加速度曲线如图 9 所示，各网格密度下弹体轴向加速度峰值差距较小，其中，疏网格与中等网格间加速度相对误差约 2.21%，中等网格与密网格间加速度的相对误差约为 0.53%，取 2mm 网格尺寸作为拉格朗日网格最小尺寸。

欧拉域的最小网格尺寸设置如表 4 所示，拉格朗日网格的最小尺寸均为 2 mm，定义 δ 为欧拉与拉格朗日最小网格尺寸比值，各网格尺寸下的弹体轴向加速度曲线结果如图 9。由图中结果可以看出，随着网格数量增加，各网格密度下的曲线演化趋势趋于一致，且轴向加速度峰值差异很小，密网格与中等网格的差距约 2.04%，中等网格与疏网格间的差距约为 2.7%。在保证计算精度的前提下，为了合理利用计算资源，选择中等网格尺寸对整个过程进行计算，仿真过程中计算时间步长由系统自动计算得出，在此不做分析。

本文分别对欧拉流体域和冰材料模型进行了独立验证，以检验跨冰入水耦合计算中主要子模型的适用性。自由液面入水实验对比表明，所建立欧拉域模型能够较好再现弹体入水过程中的自由液面扰动、空泡形态及运动响应；冰球高速冲击实验则表明，所采用冰材料模型能够较好描述冰体冲击荷载及裂纹扩展特征。本文完整跨冰入水模型沿用上述经验证的流体模型和冰材料参数，因此分项验证可分别从流体动力响应和冰体冲击破坏两方面为弹-冰-水-气耦合计算提供基础支撑。需要指

出的是，完整跨冰入水过程还包含弹-冰接触破坏、冰-水界面扰动及碎冰-流体相互作用等复杂耦合过程，目前尚缺少与本文计算工况完全一致的实验数据进行直接对比。因此，本文结合子模型实验验证、网格无关性分析及各物理场响应之间的一致性对数值模型的可靠性进行综合评估，后续仍需通过针对性的跨冰入水实验进一步验证完整耦合模型。

表 4 三种密度网格

Table 4 Three levels of generated grid

Density class	Minimum mesh size(mm)	Total number of elements	δ
Fine	2.5	3983532	1.25
Medium	3	2998930	1.5
Coarse	3.5	2424260	1.75

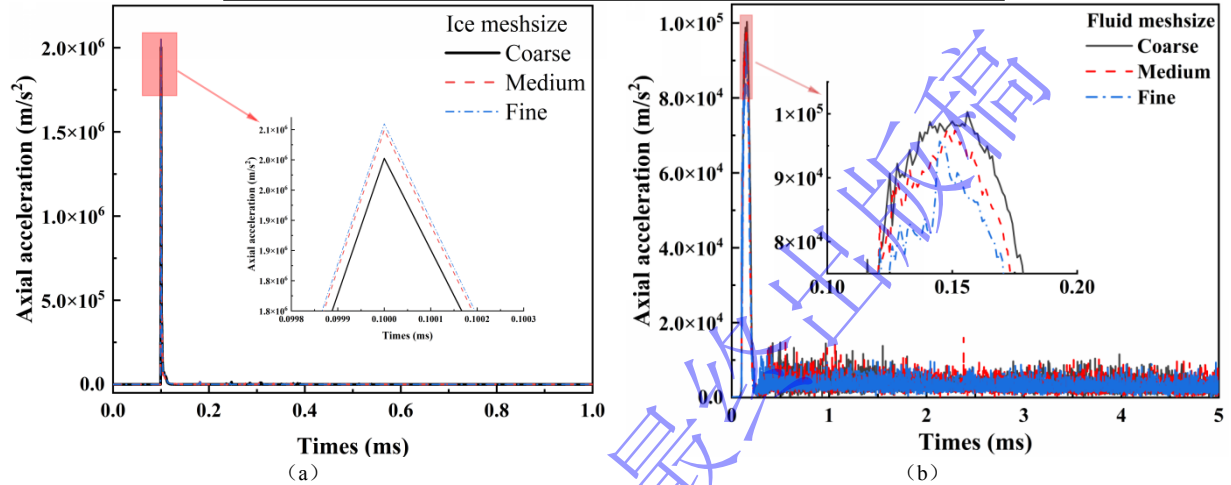


图 9 不同网格密度下弹体轴向加速度 (a) 不同拉格朗日网格密度 (b) 不同欧拉网格密度
Fig.9 Axial acceleration vs different mesh densities (a) Different Lagrangian Mesh Densities (b) Different Eulerian Mesh Densities

2 结果与讨论

2.1 跨冰入水过程分析

图 10 展示了不同头型弹体跨冰入水过程中的典型时刻，根据弹-冰-水之间相互作用的特点，可将过程划分为初始接触、贯穿冰层及水下空泡发展三个阶段。

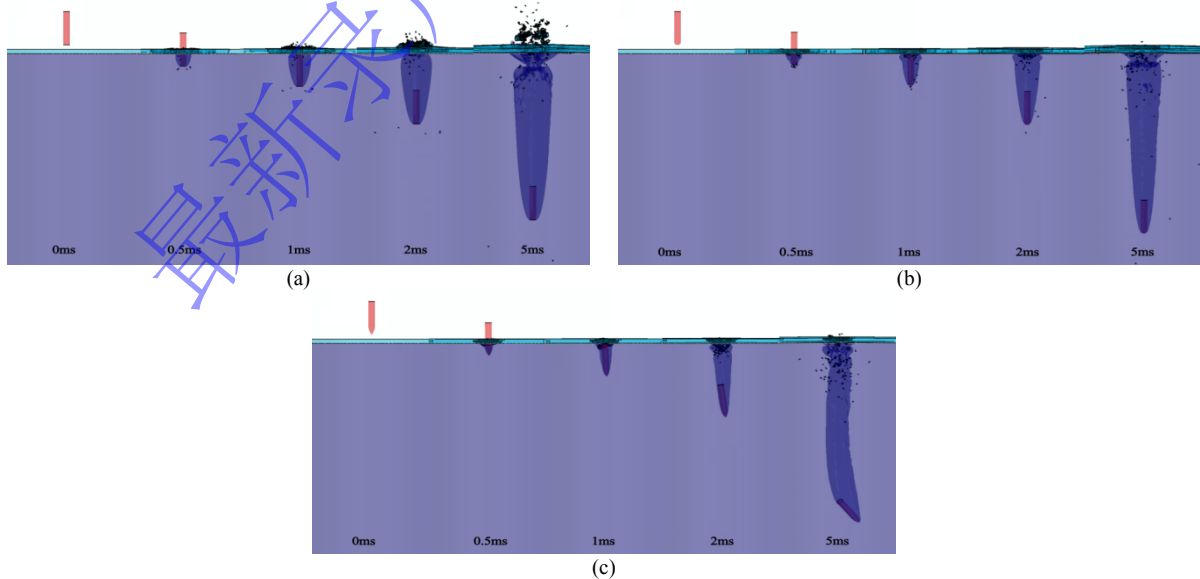


图 10 不同弹体头型破冰入水过程 (a)平头弹 (b)半球头弹 (c)卵形弹

Fig.10 Ice-breaking water entry process of different nose projectiles (a)Flat-nosed projectile (b) Hemispherical-nosed projectile (c) Ogive-nosed projectile

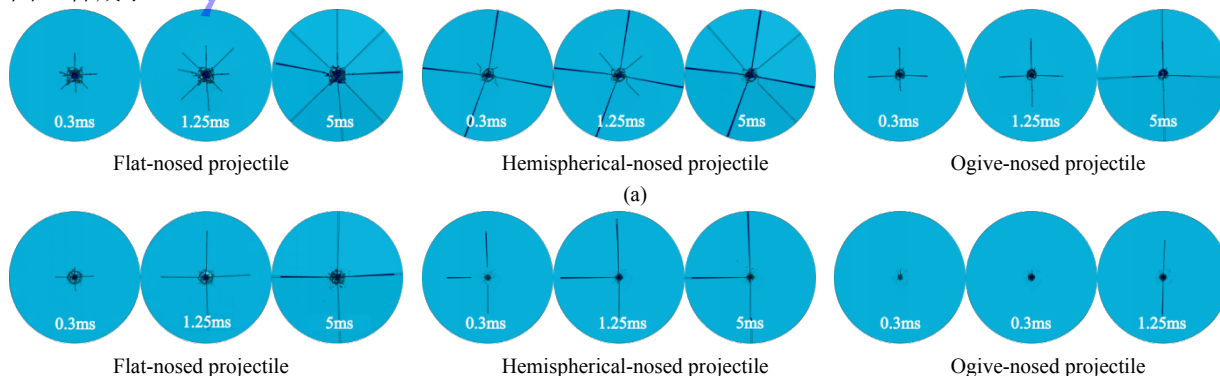
初始阶段,弹体头部接触冰层后,冲击荷载集中作用于接触点中心区域,引起冰层的局部压碎和初始损伤。随着弹体继续运动,冲击中心出现初始孔洞,碎冰开始散落,水域出现局部扰动,此时弹体尚未接触水域。进入贯穿冰层阶段后,中心损伤区域迅速扩大,冰孔附近碎片飞溅增强,冰盖表面出现局部隆起。弹体头部逐渐接触水体,形成初始空泡,空泡上部与冰水交界面相连并沿运动方向延伸。此时系统运动由弹-冰接触破坏主导逐渐转变为冰层断裂、碎冰运动和水体扰动共同控制的耦合过程。弹体基本贯穿冰层后,系统运动主要围绕水下空泡演化展开。弹体下潜将空泡沿运动方向拉长,形成连续细长空泡。冰水交界面附近保持一定扰动,孔口碎冰输运对空泡上部形态产生持续影响。

不同头型弹体跨冰入水过程呈现明显差异,平头弹冲击造成的冰孔破坏范围最大,碎冰飞溅最明显,水域扰动最强;半球头弹的破坏范围有所减弱,水域扰动相对收敛;卵形弹对冰层和水域的整体扰动最小。贯穿冰层阶段,平头弹导致冰层表面产生最明显的局部隆起,空泡上部开口较宽;半球头弹形成的冰孔破坏程度相对较弱,空泡壁较为平直;卵形弹的贯穿损伤区域最集中,空泡呈窄长形态。水下空泡发展阶段,平头弹空泡径向尺度最大,空泡轴线基本保持竖直,弹道稳定性较好;半球头弹空泡径向尺度减小但长度增加,空泡连续性较好;卵形弹空泡最细长,径向扩展最弱,但后期空泡轴线出现明显弯曲,尾流呈非对称收缩,弹体发生一定程度的弹道失稳。总之,随着头型由平头向卵形过渡,冰层扰动、孔口喷溅和空泡径向扩张趋势逐渐减弱,空泡形态由宽大饱满转变为细长收敛,而后期弹道失稳特征逐渐增强。

2.2 弹体头型和冰厚对冰盖破坏特性的影响

图 11-图 12 展示了三种厚度冰层在三种典型弹体头型冲击下的裂纹演化过程和碎冰飞溅情况。可以发现,相同冰层厚度下,平头弹冲击造成的破坏范围最大,中心破碎区明显,碎冰飞溅最剧烈,大量碎片在冲击中心附近的冰层两侧双向抛散,同时裂纹沿多方向扩展,最终形成贯穿边界的放射状裂纹网络。半球头弹的破坏程度居中,碎冰分布主要集中在冰层下方冲击中心附近,碎片数量略有减少,裂纹主要沿主裂纹方向延伸,数量较平头弹减少,但仍能形成贯穿裂纹。卵形弹的破坏最为集中,主要表现为局部穿孔和中心区域破碎,远场裂纹极少甚至不出现,冰层整体完整性较高,同时碎片飞溅情况相较于其他两种头型明显减弱,尤其在中厚和厚冰条件下,碎冰的数量极少。因此,随着头型由平头向卵形过渡,冰层扰动范围、破碎程度及裂纹数量和扩展程度均逐渐减弱。

薄冰(10 mm)条件下,不同头型弹体冲击下的冰层裂纹广泛扩展且演化完整,均经历局部损伤、径向裂纹萌生、主裂纹扩展到整体碎裂;其中,平头弹和半球头弹冲击均诱发大量径向裂纹并贯穿边界,同时可看到明显的冰层整体弯曲变形,卵形弹破坏集中于撞击点中心附近且裂纹较少。中厚冰(30 mm)条件下,裂纹生成与扩展受到明显抑制;冰盖在三种头型冲击下初期均表现为中心局部损伤,远场裂纹发展缓慢;平头弹可形成十字形主裂纹并贯穿边界,半球头弹裂纹数量较薄冰显著减少,卵形弹仅产生少数短裂纹,未形成远场裂纹。厚冰(50 mm)条件下,裂纹扩展进一步受限。三种头型的破坏均主要集中在侵彻中心附近,平头和半球头弹能诱发少量主裂纹,卵形弹则仅表现为中心局部损伤,远场冰层保持完整。整体而言,随着冰层厚度的增加,冰盖的破坏模式由薄冰下的整体开裂和大块冰碎片抛散转向厚冰下的局部损伤和少量颗粒脱落,裂纹数量和扩展范围显著减小。



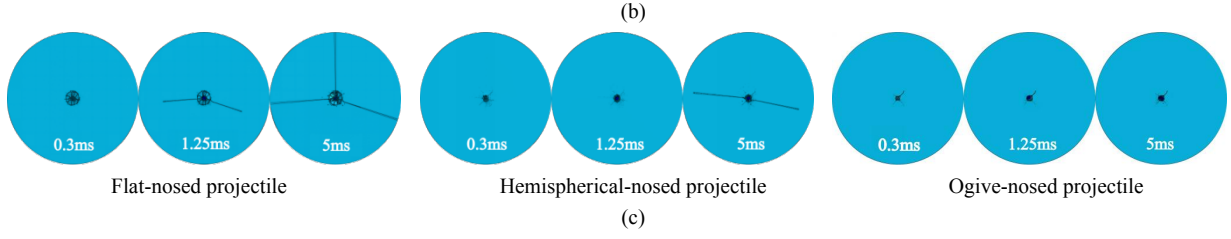


图 11 冰盖裂纹演化 (a)薄冰 (b)中厚冰 (c)厚冰

Fig.11 Crack evolution of ice sheet (a)thin ice (b)medium-thick ice (c)thick ice

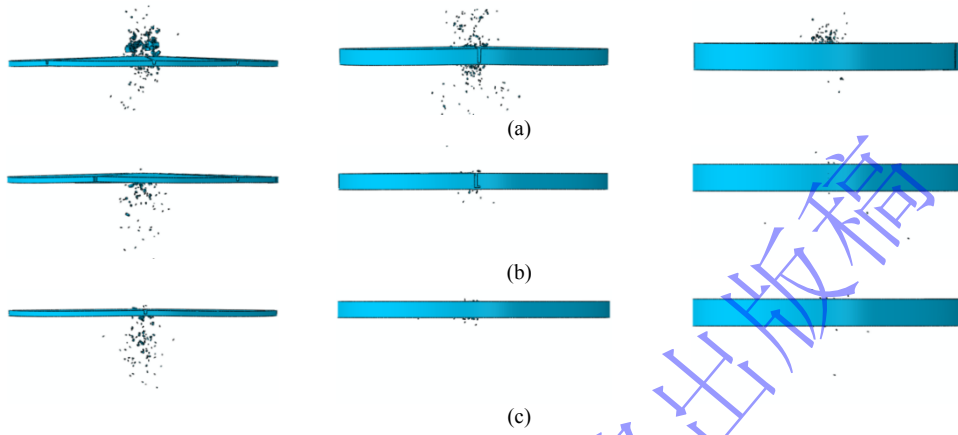


图 12 碎冰飞溅情况 (a)平头弹 (b)半球头弹 (c)卵形弹

Fig.12 Ice-fragment splashing (a)Flat-nosed projectile (b)Hemispherical-nosed projectile (c)Ogive-nosed projectile

为进一步降低仅依据裂纹形态和碎冰分布评价冰盖破坏程度所带来的主观性，本文基于计算终止时刻冰单元的状态变量对不同工况下的冰盖失效程度进行定量统计。将最终时刻失效删除的冰单元数量记为 N_f ，冰盖初始总单元数量记为 N_t ，定义失效单元率如下式：

$$R_f = \frac{N_f}{N_t} \times 100\%$$

用以表征不同工况下冰盖的整体失效程度，结果见图 13。由于不同冰厚模型所包含的冰单元总数存在差异，采用归一化失效单元率而非失效单元绝对数量进行比较。

从图 13 可以看出，在相同冰层厚度条件下，失效单元率均表现为平头弹最高、半球头弹次之、卵形弹最低。结果表明随着弹体头型由钝向尖锐过渡，冰盖整体材料失效程度明显减弱，破坏逐渐向侵彻中心附近集中，这与图 11 和图 12 所示裂纹扩展及碎冰分布规律一致。

同时，在相同弹体头型条件下，失效单元率均随冰层厚度增加而降低。冰厚由 10 mm 增加至 50 mm 时，平头弹、半球头弹和卵形弹对应的失效单元率分别降低约 45.12%、51.72%和 51.24%，说明随着冰层厚度增加，冰盖远场失效受到明显抑制，整体破坏程度降低，失效区域逐渐向冲击中心附近集中。该定量结果进一步验证了前述冰盖破坏由薄冰条件下大范围开裂逐渐向厚冰条件下局部破坏转变的规律。

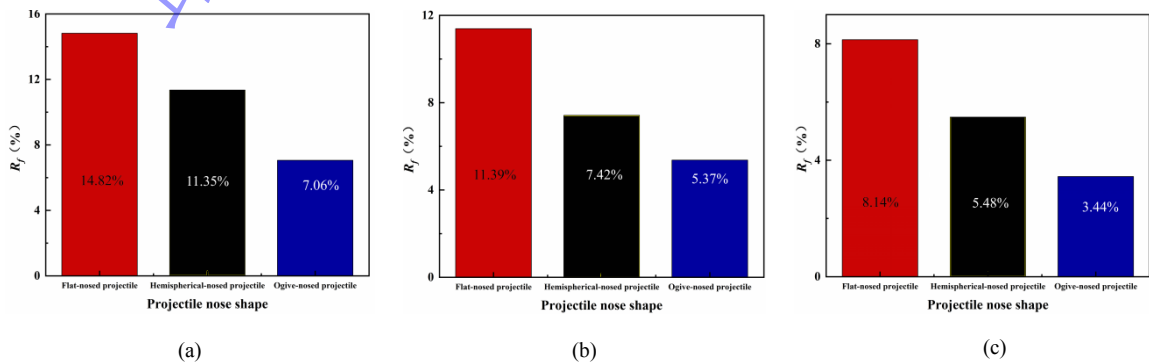


图 13 冰层失效单元比例 (a)薄冰 (b)中厚冰 (c)厚冰

Fig.13 Failed ice element ratio (a)thin ice (b)medium-thick ice (c)thick ice

图 14 进一步展示了弹-冰接触初始时刻冰层应力云图。在本模型中，冰层的拉伸开裂主要由最大抗拉强度失效准则控制，当最大主拉应力达到抗拉强度后相应单元发生失效删除，从而表征径向裂纹及局部断裂过程；冲击中心附近的压缩破坏则主要通过应变率相关的压缩屈服响应进行描述。平头弹作用下，薄冰中高应力区不仅集中于冲击中心，同时形成同心环状应力带与径向应力通道，扰动可向远场传播，有利于形成复杂放射状裂纹网络。随冰厚增加，高应力区向冲击中心收缩，冰层破坏模式由整体开裂转向局部损伤与有限主裂纹扩展。半球头弹应力分布相对更为集中，薄冰下冲击中心附近仍形成较大高应力区并在一定范围内扩散，但径向通道不如平头弹连续，裂纹网络复杂程度降低；中厚冰及厚冰下高应力区进一步收缩，破坏转向局部压碎。卵形弹应力场局部化最明显，无论冰厚如何，高应力区均集中于侵彻通道附近，外围应力和径向通道极弱，厚冰条件下几乎完全限制于中心区域，远场保持低应力状态，难以建立连续应力传播路径，仅出现局部损伤，未形成明显径向裂纹扩展。

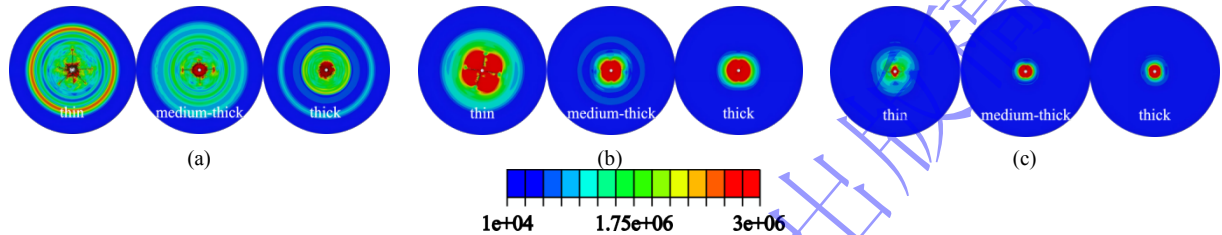


图 14 弹-冰接触初始时刻冰层 Mises 应力云图(Pa) (a)平头弹 (b)半球头弹 (c)卵型弹

Fig.14 Mises stress contours of the ice-layer at the initial stage of penetration(Pa) (a)Flat-nosed projectile (b)Hemispherical-nosed projectile (c)Ogive-nosed projectile

不同头型弹体与不同厚度冰层在跨冰入水过程中的动能变化曲线如图 15 所示。需要说明的是，图中所示动能仅反映弹体及冰层宏观运动状态的变化，并不能代表弹-冰相互作用过程中的完整能量分配。弹体撞击冰层过程中，其初始动能除转化为冰层整体及碎片运动所对应的动能外，还可能以冰层弹性变形、材料损伤与断裂耗散、接触作用以及后续流体扰动等形式发生转移或耗散。因此，本文主要利用动能变化表征不同工况下弹体运动衰减以及冰层宏观运动响应的相对强弱，而不对各能量分量之间的具体转化比例作定量判断。

由图 15 可以看出，在相同冰层厚度条件下，平头弹作用时冰层动能增长最为显著，同时弹体自身动能衰减也较为明显，表明平头弹冲击能够诱发更强的冰盖整体运动及碎片运动响应。结合图 11~14 中的破坏形态和应力分布可以发现，平头弹作用下冰层整体弯曲、径向裂纹扩展及碎冰飞溅均较为明显。同时，半球头弹作用下冰层动能增长幅度相对减小，其冰盖整体运动及碎片抛散程度亦弱于平头弹，对应的冰层破坏主要表现为有限主裂纹扩展和局部碎裂。卵形弹作用下冰层动能增长最小，弹体动能衰减相对较弱，说明其对冰盖整体运动的激发作用较弱。结合应力场及破坏形态可以看出，卵形弹作用下高应力区主要集中在侵彻通道附近，冰层远场运动和裂纹扩展受到限制，破坏形式因而更趋于局部穿孔和中心损伤。总体而言，不同头型条件下冰层动能响应与宏观破坏范围具有较好的对应关系，但具体破坏机制仍是局部应力状态、材料损伤、裂纹扩展及碎片运动等多种过程共同作用的结果。

为了更进一步揭示不同头型弹体冲击下的冰层破坏机理，本文在厚冰冰层靠近水面一侧布置四个观测点，位置如图 16 (a) 所示。以观测点 1 上的数据为例，图 16 给出了冲击点附近冰层靠近水面一侧同一观测点的压力历程曲线并对其积分得到冲量变化曲线。可以发现，观测点处的压力响应和冲量演化与弹体头型的变化高度相关。平头弹产生了最高的压力峰值和最大的累计冲量，这是由于其钝头结构在撞击过程中形成大面积压缩接触，使冰层发生强烈的局部压碎和剪切塞入破坏。相比之下，半球头弹在侵入过程中接触面积逐渐增大，加载过程更加平缓 and 渐进，因此其压力幅值最低。卵形弹的压力峰值介于平头弹和半球头弹之间，但其冲量峰值出现时间相对滞后，说明卵形弹的荷载传递并非主要由初始冲击瞬间控制，而是与局部侵入、裂纹扩展以及冰层分阶段破坏过程密切相关。

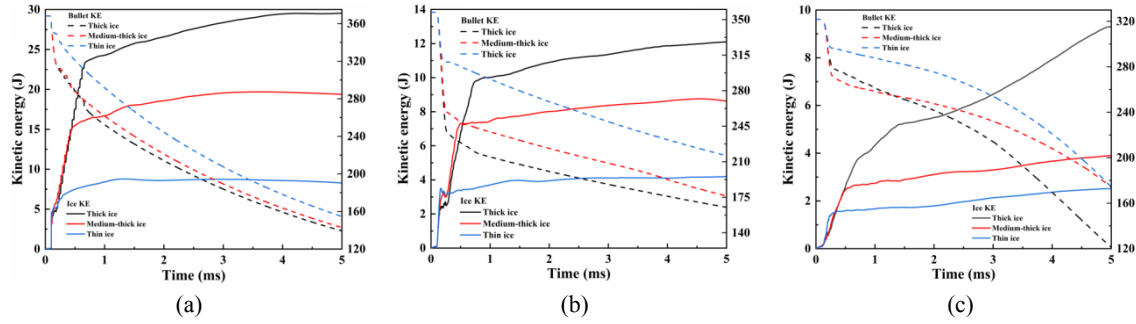


图 15 不同头型弹体与不同厚度冰层在跨冰入水过程中的动能变化曲线(a)平头弹 (b)半球头弹 (c)卵形弹
Fig.15 Kinetic energy histories of projectiles with different nose shapes and ice thicknesses during trans-ice water entry (a)Flat-nosed projectile (b)Hemispherical-nosed projectile (c)Ogive-nosed projectile

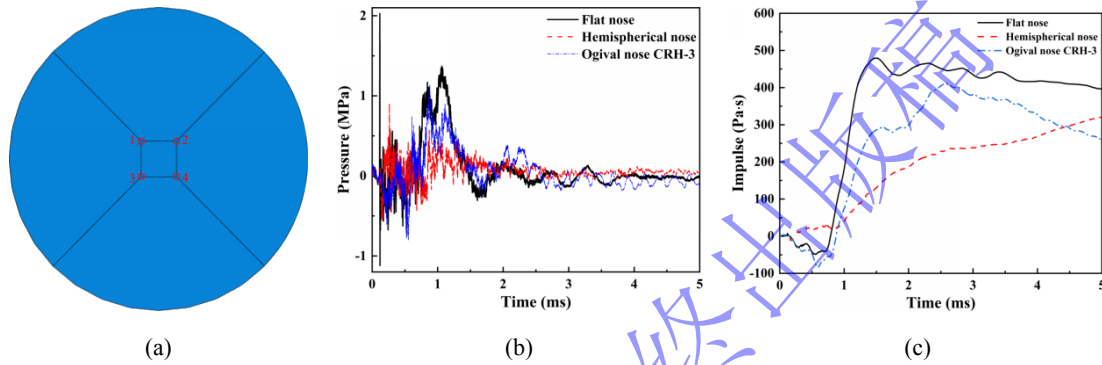


图 16 观测点处压力及冲量演化曲线 (a)观测点位置 (b)压力曲线 (c)冲量曲线

Fig.16 Pressure and impulse variations at the observation point (a)observation point location (b)Pressure histories (c)Impulse evolution

综上所述,冰盖破坏模式及裂纹演化过程的转变并非由单一因素决定,而是与冰层宏观动能响应、弹-冰接触过程中应力的空间扩散特征以及冰层材料损伤和破坏过程共同相关。头型越钝,冰层整体运动响应和远场应力扰动越明显,冰盖更容易发生整体弯曲、径向裂纹扩展及碎片飞溅;随着头型逐渐尖锐,冲击作用趋于集中在侵彻通道附近,远场应力扰动及冰层整体运动减弱,破坏逐渐表现为局部压碎和穿孔。随着冰层厚度增加,裂纹扩展受到进一步抑制,破坏模式由薄冰条件下的大范围开裂和碎片飞溅逐渐向厚冰条件下的局部压碎、穿孔和有限损伤转变。

2.3 弹体头型和冰厚对弹体荷载特性的影响

本文所分析的弹体轴向加速度取自全局坐标系下沿弹体初始轴线方向的加速度分量。图 17 对比了不同头型弹体跨冰入水过程中三种冰厚条件下的轴向加速度荷载特性,整个过程可分为弹体侵彻冰层和入水两个阶段,同时弹体头型和冰厚对弹体跨冰入水荷载特性有着显著的影响。平头弹的加速度信号存在明显的高频脉冲和不规则波动,荷载峰值显著高于其他两种头型;相比之下,半球头弹的轴向加速度峰值明显降低,但信号脉宽相对更长,冲击作用呈现出从强瞬态冲击向平缓加载过渡的特征;而卵形弹的轴向加速度整体较低,信号脉宽进一步增大,平缓加载模式的特征更加显著。不同头型弹冲击载荷间的差异主要受弹-冰作用模式影响,因为平头弹初始接触面积较大,冲击荷载在短时间内集中于冲击中心区域,引发冰层局部压碎并形成破碎核心区,随后径向裂纹与次生裂纹的扩展导致冰层承载能力发生突变,弹-冰接触过程呈现反复的“加载-破裂卸载-再接触加载”模式,因此轴向加速度信号中出现多个尖锐脉冲。此外,平头弹冲击下碎冰飞溅现象更为剧烈,大量碎冰在冰孔附近剥离、抛射并发生二次碰撞,与入水初期形成的空泡及自由液面扰动相互作用,进一步增强了荷载波动的随机性。半球头弹在侵彻冰层过程中,头部接触面积随侵彻深度逐渐增大,弹-冰作用区域由局部接触逐步扩展,荷载增长与释放过程相对平缓。而卵形弹与冰的初始接触面积最小,弹体对冰层的作用更接近于局部穿刺、楔入和渐进开孔过程,冰层不易形成大范围瞬时压碎和强烈的碎冰飞溅,所以弹体荷载随侵彻深度的增长趋势更为缓慢。同时发现,三种弹体加速度峰值和主峰脉宽随着冰层厚度增加而逐渐增大、变宽,后续不规则波动也更加明显。

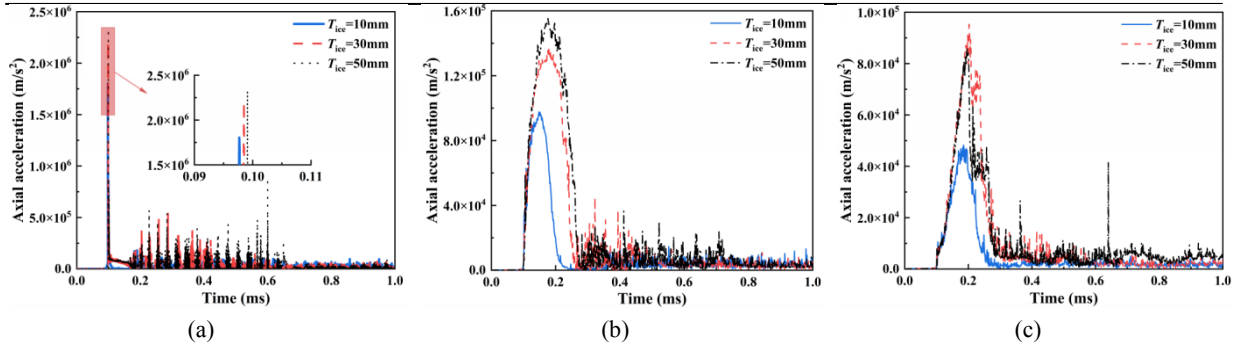


图 17 不同头型弹体跨冰入水中在三种冰厚条件下的轴向加速度 (a)平头弹 (b)半球头弹 (c)卵形弹

Fig.17 Time-domain axial acceleration signals of projectiles with different nose shapes under three ice thicknesses (a)Flat-nosed projectile (b)Hemispherical-nosed projectile (c)Ogive-nosed projectile

为进一步探究冲击载荷信号的频率成分,为进一步揭示不同弹体头型及冰层厚度条件下跨冰入水冲击响应的频率组成特征,在时域分析的基础上,对数值计算获得的弹体轴向加速度时程进行频域转换。各工况均采用相同的时间采样方式提取轴向加速度数据,计算总时长为 5 ms,共获得约 5000 个时域采样点,对应采样频率约为 1 MHz。采用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)对时域信号进行处理,获得其频域幅值谱。考虑到本文研究对象为有限时长瞬态冲击信号,为避免窗函数对冲击主峰造成额外幅值衰减,FFT 处理中采用矩形窗,不进行额外加窗处理。为保证不同工况频谱结果具有可比性,各组加速度信号均采用相同的 FFT 处理设置获得幅值谱。本文频域分析主要用于比较不同头型及冰层厚度条件下频谱幅值分布和主要响应频带的相对变化特征,不对特定频率成分的能量占比进行定量评价。由于刚性弹体不考虑自身弹性变形,其频谱不能表征结构振动模态,而主要反映跨冰入水过程中外部冲击荷载随时间变化的快慢、突变程度及不同时间尺度下的载荷频率组成。各头型冲击三种厚度冰形成的轴向加速度频谱曲线如图 18 所示。

从整体频谱分布可看出,在相同冰厚条件下,平头弹频谱幅值在整个频带内均保持最高。频域中的宽频高幅值特征,对应于时域中窄脉宽、多尖峰和不规则振荡的加速度响应。其原因在于,平头弹的端面几何形状使弹-冰接触刚度在极短时间内快速建立,又随着冰层局部失效和碎冰脱离发生快速释放,导致轴向合力呈现多次突变。对于刚性弹而言,这种接触刚度和阻滞力的快速变化不会转化为弹体弹性振动,而是直接表现为质心加速度中的高频成分。因此,平头弹频谱中的强高频幅值说明其侵彻过程具有更强的非连续性和更短的荷载作用时间。半球头弹的频谱幅值明显低于平头弹,尤其高频成分受到显著抑制,但其在低频和中低频范围内仍保持一定响应。这说明半球头弹的轴向荷载变化不再以强烈的瞬时突变为,而是更多表现为相对连续的加载过程。结合图 18 中的时域结果,半球头弹较低的加速度峰值和较宽的主峰脉宽特征在频域信号中表现为高频幅值减弱、主要响应向较低频率范围集中。这主要是因为,半球头的接触面积和接触刚度随侵彻深度逐渐增长,削弱了荷载瞬时建立速率;同时,冰层承载能力的衰减过程更加连续,具体表现为轴向合力的变化时间被拉长。卵形弹的频谱幅值整体最低,高频段响应最弱,说明其轴向合力的快速波动成分最少。与图 17 中低峰值、弱波动的时域特征相对应。卵形弹的频谱结果表明尖锐头型对冲击荷载传递具有明显的缓冲作用。由于卵形头部接触面积增长更缓慢,弹-冰作用区的扩展过程更加渐进,弹体所受轴向合力不会在短时间内发生剧烈突变,荷载作用过程表现出较好的连续性,这种荷载建立过程主要表现为其频谱能量主要被限制在较低幅值水平,高频成分较弱。

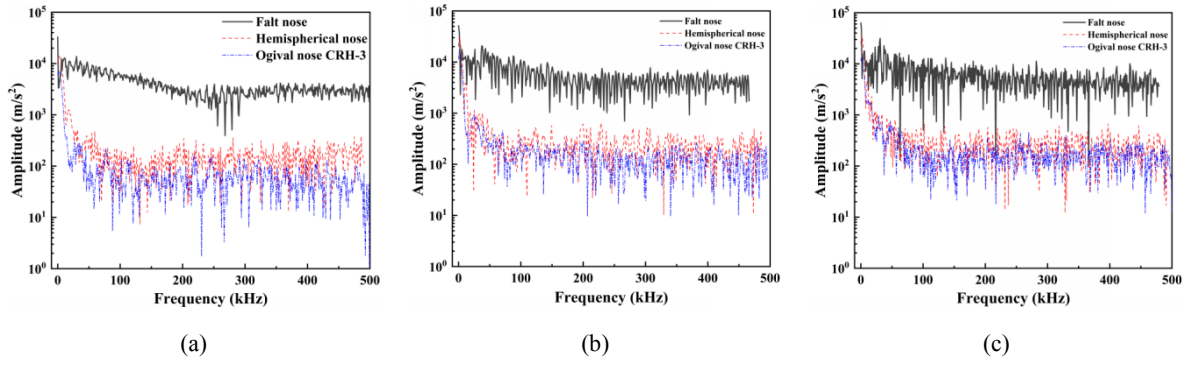


图 18 不同头型弹体轴向加速度频域信号 (a)薄冰 (b)中厚冰 (c)厚冰

Fig.18 Frequency-domain signals of axial acceleration for projectiles with different nose shapes (a)thin ice (b)medium-thick ice (c)thick ice

2.4 弹体头型和冰厚对空泡演化与流场扰动特性的影响

为进一步分析冰层厚度对后续空泡演化的影响, 需要考虑不同冰厚条件下弹体穿冰阶段速度损失所造成的入水状态差异。图 19 给出了三种头型弹体在不同冰厚条件下的速度时程曲线, 高亮部分为。从图中可以看出, 在弹体与冰层发生主要作用的初始阶段, 速度均出现明显衰减, 且总体上随着冰层厚度增加, 速度损失程度增大。因此, 不同冰厚条件下的空泡演化不能简单理解为冰层厚度的单一直接作用。一方面, 冰层增厚使弹体在穿冰过程中发生更大的速度和动能损失, 从而降低进入水域后的动压水平及径向排水能力, 对空泡扩展产生抑制作用; 另一方面, 冰层厚度还会改变冰孔尺度、碎冰分布及冰-水界面对空泡上部的约束状态。尤其对于卵形弹, 中厚冰和厚冰条件下 1 ms 时的速度及动能基本一致, 而后续流场和空泡形态仍存在差异, 说明冰厚所引起的界面约束及弹体运动稳定性变化同样是影响空泡发展的重要因素。由此可见, 本文观察到的空泡尺度及闭合特征变化是冰层阻滞作用、弹体剩余运动状态和冰-水界面约束共同作用的结果。

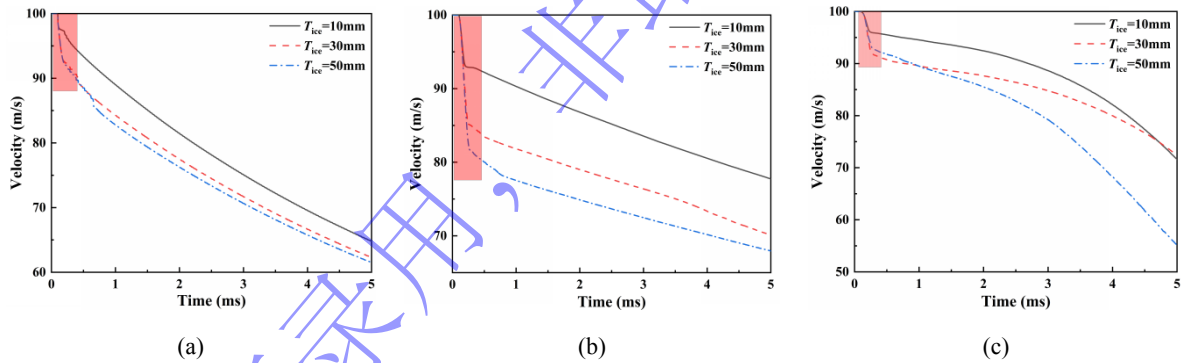


图 19 不同头型弹体跨冰入水速度衰减曲线(a)平头弹 (b)半球头弹 (c)卵形弹

Fig.19 Velocity attenuation curves of projectiles with different nose shapes during trans-ice water entry(a)Flat-nosed projectile

(b)Hemispherical-nosed projectile (c)Ogive-nosed projectile

结合上述弹体运动状态变化及图 20 可以发现, 随着冰层厚度增加, 在相同头型条件下, 空泡长度、径向尺度以及上部开口范围总体呈减小趋势, 冰-水界面处的扰动和尾流飞溅同步减弱, 空泡尾部闭合时间逐渐提前。该现象一方面与厚冰条件下弹体速度和动能衰减增强、入水后径向排水能力减弱有关; 另一方面, 冰层增厚后冰孔形态、碎冰运动及冰-水界面对空泡上部发展的约束也随之改变。因此, 空泡特性的变化应理解为冰厚及其引起的弹体运动状态变化共同作用的结果。在薄冰条件下, 空泡扩展更为充分, 除平头弹体形成的空泡外, 几乎不会出现尾部闭合现象; 中厚冰条件下, 尾流收缩效应增强并伴随局部缩颈现象; 而在厚冰条件下, 空泡尾部以最快速率收缩, 闭合位置向前移动, 整体空泡趋于更短、更窄且更具局部化特征。

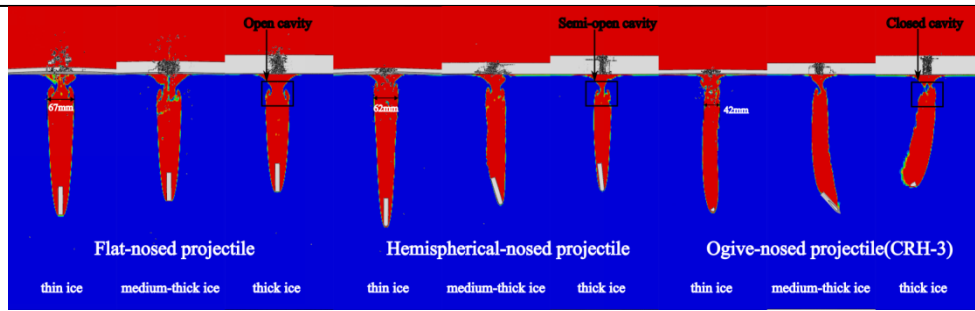


图 20 不同冰盖条件下欧拉域体积分数

Fig.20 Eulerian-domain volume fraction under ice-cover conditions

欧拉域中的压力场与速度场对于分析入水过程中的空泡演化及流场扰动特性具有重要意义。图 21 展示了计算域在 5ms 时的速度场分布情况，清晰地呈现了不同工况下空泡内部高速气流的分布特征。显而易见的是，在不同头型和冰层厚度条件下，空泡内高速气流的空间分布情况存在显著差异。对于平头弹而言，高速区域分布范围较广，局部高值区域主要集中在空泡上中部及轴向核心区域；半球形弹的高速区域相对局限，通常呈现连续的轴向分布；而卵形头弹的高速区域则表现出明显的偏移现象，特别是在中厚冰层条件下，高速气体区域沿空泡弯曲方向呈现不对称分布。值得注意的是，随着冰厚增加，高速气体分布不再简单地与空泡几何尺寸相匹配，而是呈现出局部集中、离散化或偏移加剧等特征。这一现象表明，在厚冰条件下，空泡内的高速流动更容易受到孔洞开裂限制、尾流收缩以及弹体姿态变化的影响，从而形成更为复杂的非对称流场结构。

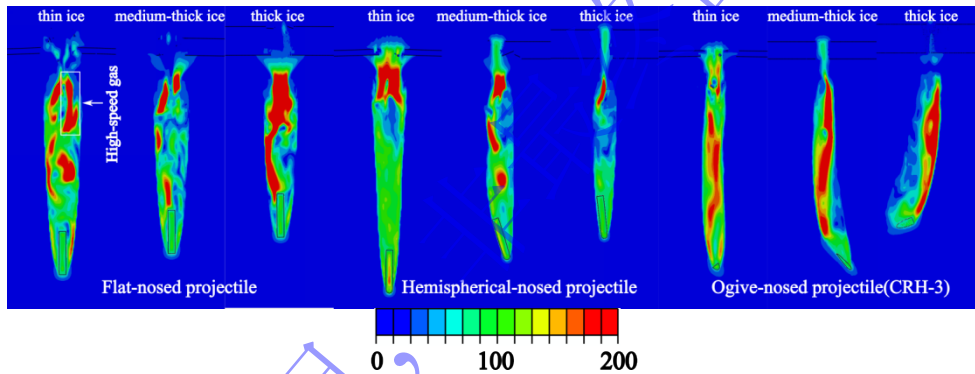


图 21 欧拉材料在 5 ms 时的速度(m/s)

Fig.21 Velocity of Eulerian material at 5 ms(m/s)

图 22 所示为不同工况下入水初始时刻欧拉域内的压力场分布。在入水初期，欧拉域内的压力分布反映了冰层穿透后弹对水体区域产生的初始压缩效应、压力波扩散以及冰-水界面附近的流场扰动所呈现的空间特征。当平头弹入水后，在薄冰条件下弹头下方会形成明显的高压区，并伴随多个向深水区域及两侧传播的弧形压力波，受压力影响的区域最广，这一特征与先前观测到的平头弹引发的大空泡、强烈的自由表面扰动以及显著的尾流飞溅现象完全吻合。在中厚冰条件下，平头弹下方仍存在较为清晰的压力波分布，但近场高压区及弧形波前范围均较薄冰条件时有所减小，水体区域内的扰动强度也相应减弱。在厚冰条件下，压力主要集中在弹头前端及冰孔附近区域，而远场压力波则显著减弱，水域中仅能观测到局部微弱波动。半球形弹头产生的压力场范围和强度均低于平头弹头；对于卵形弹而言，压力扰动主要集中在弹头前端和冰孔处，远场水域中的压力波较弱。随着冰层厚度增加，三种不同弹头形状下的压力波传播范围均显著收缩，远场水体扰动亦减弱，这一现象与体积分数分布图中观察到的冰-水界面扰动减弱的现象一致。

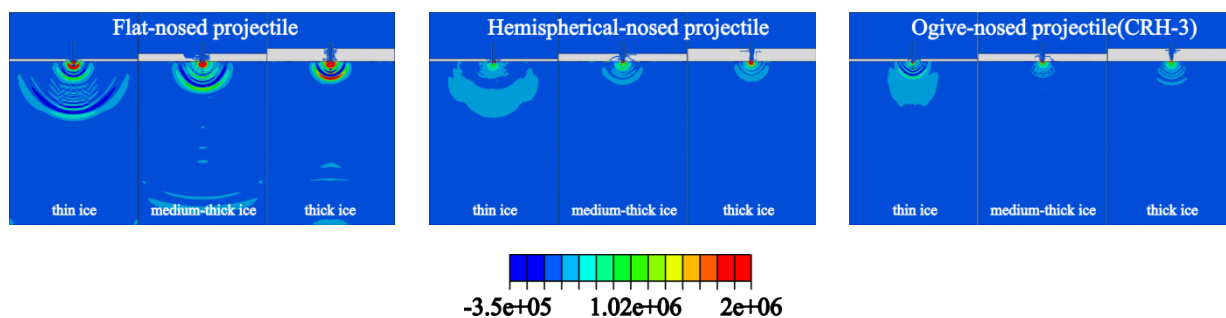


图 22 不同工况下水初始时刻欧拉域内的压力场分布(Pa)

Fig.22 Pressure distribution in the Eulerian domain at the initial stage of water entry(Pa)

3 结论

本文分别对不同头型及冰层厚度条件下航行体跨冰入水过程进行数值模拟,讨论了航行体高速冲击下冰盖的裂纹扩展演化及冲击载荷的时、频域特性,并分析了各因素对入水后流场内空泡发展特征的影响,主要结论如下:

(1) 不同头型弹体跨冰入水过程存在显著差异。弹体头型由钝向尖锐转变,其在运动过程中对冰层造成的破坏程度逐渐减弱,入水后的空泡形态由宽大饱满转变为细长收敛,完全入水后的弹道失稳特征逐渐增强。

(2) 弹体头型和冰层厚度共同影响冰盖的破坏模式,其中平头弹破坏最严重,半球头弹次之,卵形弹主要造成局部损伤。随着冰层增厚,破坏形式由大范围开裂和碎裂逐渐转变为以中心压碎和局部穿孔为主的有限损伤。

(3) 弹体头型和冰层厚度对轴向冲击荷载的时频特性具有明显影响。随着弹体头型由平头向卵形过渡,轴向加速度峰值及频谱幅值逐渐降低,时域信号由剧烈波动逐步趋于平缓,主峰脉宽增大,高频范围内的响应幅值相对减弱。随着冰层厚度增加,轴向加速度频谱分布发生明显变化,不同频率范围内的响应幅值及分布特征存在差异。

(4) 破冰入水过程中,射弹对水域扰动在其侵彻冰层及入水的初期阶段随弹体头型由钝变尖逐渐减弱,但后期由于受弹道失稳影响,卵形弹的扰动强度增强。同时,随着冰层厚度的增加,侵彻形成的空泡趋于变得更短、更窄且更具局部化特征。值得注意的是,随着冰厚增加,空泡内的高速气体分布不再简单地与空泡几何尺寸相匹配,而是呈现出局部集中、离散化或偏移加剧等特征。

参考文献

- [1] 明付仁,王嘉捷,刘文韬,等. 高速跨介质入水多相流动与流固耦合特性研究综述[J]. 空气动力学学报, 2024, 42(1): 68-85. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2023.0197.
MING F R, WANG J J, LIU W T, et al. Review of multiphase flow and fluid-structure interaction of high-speed water entry[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2024, 42(1): 68-85. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2023.0197.
- [2] 刘君遥,于勇. 受约束航行体跨介质试验方案设计及其 CFD 分析[J]. 航空学报, 2023, 44(21): 528488. DOI: 10.7527/S1000-6893.2023.28488.
LIU J Y, YU Y. Experimental scheme design of constrained vehicle in a trans-media process and CFD analysis of scheme[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(21): 528488. DOI: 10.7527/S1000-6893.2023.28488.
- [3] WANG H, LUO Y C, CHEN Z H, et al. Influences of ice-water mixture on the vertical water-entry of a cylinder at a low velocity[J]. Ocean Engineering, 2022, 256: 111464. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111464.
- [4] WANG H, HUANG Z G, 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.
- [5] ZHONG K, NI B Y, YAO H D, et al. Water-entry beside level ice based on immersed boundary coupled with lattice Boltzmann method-volume-of-fluid approach[J]. Physics of Fluids, 2025, 37(8): 083405. DOI: 10.1063/5.0286976.

- [6] REN H, ZHAO X. Numerical simulation for ice breaking and water entry of sphere[J]. Ocean Engineering, 2022, 243: 110198. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.110198.
- [7] CUI W Z, KONG D C, SUN T Z, et al. Coupling dynamic characteristics of high-speed water-entry projectile and ice sheet[J]. Ocean Engineering, 2023, 275: 114090. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.114090.
- [8] HU X Y, WEI Y J, WANG C, et al. Analysis of influencing factors of the projectile entering the water through the ice hole[J]. Ocean Engineering, 2023, 280: 114563. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.114563.
- [9] 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[J]. 兵工学报, 2024, 45(10): 3371-3384. DOI: 10.12382/bgxb.2024.0420.
- HUANG Z G, WANG H, CAI X W, et al. Influence of velocity on cavity flow characteristics of projectile vertically breaking ice and entering water[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(10): 3371-3384. DOI: 10.12382/bgxb.2024.0420.
- [10] 薛雯鑫, 刘涛涛, 董清晨, 等. 平整冰覆盖下球体斜入水过程数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2024, 39(6): 840-852. DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2024.06.002.
- XUE W X, LIU T T, DONG Q C, et al. Numerical simulation of oblique water entry of a sphere under level ice cover[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2024, 39(6): 840-852. DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2024.06.002.
- [11] 汪春辉, 王嘉安, 王超, 等. 基于 S-ALE 方法的圆柱体垂直出水破冰研究[J]. 力学学报, 2021, 53(11): 3110-3123. DOI: 10.6052/0459-1879-21-217.
- WANG C H, WANG J A, WANG C, et al. Research on vertical movement of cylindrical structure out of water and breaking through ice layer based on S-ALE method[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(11): 3110-3123. DOI: 10.6052/0459-1879-21-217.
- [12] ZHANG Y H, LIU R W, YUAN L H, et al. Ice breaking by low-velocity impact with a rigid sphere[J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 182: 104786. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104786.
- [13] ZHANG Y H, WANG Q, OTERKUS S, et al. Numerical investigation of ice plate fractures upon rigid ball impact[J]. Ocean Engineering, 2023, 287: 115824. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115824.
- [14] 张海涛, 鹿麟, 杨帅, 等. 冰层厚度对结构物破冰入水运动特性的影响[J/OL]. 爆炸与冲击, 2026. DOI: 10.11883/bzycj-2025-0415.
- ZHANG H T, LU L, YANG S, et al. Effects of ice sheet thickness on the motion characteristics of a structure during ice-breaking water entry[J/OL]. Explosion and Shock Waves, 2026. DOI: 10.11883/bzycj-2025-0415.
- [15] 方城林, 魏英杰, 王聪, 等. 不同头型高速射弹垂直入水数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(10): 77-82. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.10.011.
- FANG C L, WEI Y J, WANG C, et al. Numerical simulation of vertical high-speed water entry process of projectiles with different heads[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(10): 77-82. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.10.011.
- [16] 刘思华, 王占莹, 李利剑, 等. 头型对射弹高速入水稳定性的影响[J]. 航空学报, 2023, 44(21): 528437. DOI: 10.7527/S1000-6893.2023.28437.
- LIU S H, WANG Z Y, LI L J, et al. Influence of nose shapes on high-speed water entry stability of projectile[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(21): 528437. DOI: 10.7527/S1000-6893.2023.28437.
- [17] 路丽睿, 魏英杰, 王聪, 等. 不同头型射弹低速倾斜入水空泡及弹道特性试验研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(7): 1364-1371. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.07.014.
- LU L R, WEI Y J, WANG C, et al. Experimental study on cavity and ballistic characteristics of projectiles with different nose shapes during low-speed oblique water entry[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(7): 1364-1371. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.07.014.
- [18] 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): 113902. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0498.
- LUO Y C, HUANG Z G, GAO J G, et al. Experimental study on low-speed oblique water entry of truncated cone-shaped projectile[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(11): 113902. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0498.

- [19] 施红辉, 胡青青, 陈波, 等. 钝体倾斜和垂直冲击入水时引起的超空泡流动特性实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(5): 617-624. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0617-08.
SHI H H, HU Q Q, CHEN B, et al. Experimental study of supercavitating flows induced by oblique and vertical water entry of blunt bodies[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(5): 617-624. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0617-08.
- [20] 高英杰, 孙铁志, 张桂勇, 等. 回转体高速倾斜入水的流场特性及结构响应[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(12): 123301. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0014.
GAO Y J, SUN T Z, ZHANG G Y, et al. Flow characteristics and structure response of high-speed oblique water entry for a revolution body[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(12): 123301. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0014.
- [21] 黄振贵, 范浩伟, 陈志华, 等. 空心弹高速入水机理及特性数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(1): 013301. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0156.
HUANG Z G, FAN H W, CHEN Z H, et al. Numerical simulation study on the mechanism and characteristics of high-speed water entry of hollow projectiles[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(1): 013301. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0156.
- [22] SHI Y, GAO X F, PAN G. Experimental and numerical investigation of the frequency-domain characteristics of impact load for AUV during water entry[J]. Ocean Engineering, 2020, 202: 107203. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107203.
- [23] 刘涛涛, 杨林海, 孔德才, 等. 空泡演化对航行体高速入水运动特性的影响研究[J]. 北京理工大学学报, 2024, 44(11): 1165-1174. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2024.041.
LIU T T, YANG L H, KONG D C, et al. Influence of cavity evolution on motion characteristics of high-speed projectile water entry[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2024, 44(11): 1165-1174. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2024.041.
- [24] HU X Y, WEI Y J, WANG C. Cavity dynamics of the projectile passing through the ice hole[J]. Journal of Applied Physics, 2023, 133(11): 114702. DOI: 10.1063/5.0142204.
- [25] LU L, ZHANG D X, QI X B, 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.
- [26] YUAN Q E, GONG Z X, ZHAO Z X, et al. Ice model crevice effect on vertical water-entry of a sphere[J]. Ocean Engineering, 2024, 300: 117425. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.117425.
- [27] 张润东, 段金雄, 孙铁志, 等. 自由面碎冰环境高速入水动力学特性[J]. 空气动力学学报, 2024, 42(1): 100-112. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2023.0191.
ZHANG R D, DUAN J X, SUN T Z, et al. Dynamic characteristics of high-speed water entry in an environment of free water surface with crushed ice[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2024, 42(1): 100-112. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2023.0191.
- [28] 杨帅, 鹿麟, 胡彦晓, 等. 破碎浮冰环境下结构物倾斜入水空泡演化特性实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(5): 053401. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0229.
YANG S, LU L, HU Y X, et al. Experimental study on cavity evolution characteristics of an oblique water-entry structure in a broken floating ice environment[J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(5): 053401. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0229.
- [29] HU X Y, WEI Y J, WANG C. Study on water entry characteristics of the projectile colliding with floating ice based on fluid-structure interaction method: dynamic response and energy conversion[J]. Energy, 2023, 283: 129184. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129184.
- [30] 鹿麟, 杨鹏杰, 刘澜洋, 等. 碎冰环境下运动体入水空泡演化特性实验研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44(6): 137-143. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2025.06.015.
LU L, YANG P J, LIU L Y, et al. Experimental study on water-entry cavity evolution characteristics of a moving body in a brash ice environment[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(6): 137-143. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2025.06.015.

- [31] 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.
DOI:10.1016/j.ijimpeng.2013.01.013.
- [32] CHEN T, HUANG W, ZHANG W, QI Y, GUO Z, et al. Experimental investigation on trajectory stability of high-speed water entry projectiles[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 175: 16-24. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.02.021.

Projectile Impact Loads and Ice-Cover Failure Characteristics during

High-Speed Projectile Water Entry Through Ice

SU Haowen, GUO Zitao, LIN Yongkang, LU Puyan, SHEN Aijia

(School of Civil Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan, China)

Abstract: Under polar ice-covered conditions, the ice-breaking water-entry process of a vehicle involves ice-cover fracture, ice-fragment splashing, cavity formation after the vehicle enters the water, and flow-field disturbances, constituting a typical multi-medium coupled dynamic problem. Compared with conventional water entry through a free surface, the presence of ice layer alters the pre-entry motion state and load distribution of the vehicle, and significantly affects the subsequent underwater cavity morphology and flow-field evolution. To elucidate the dynamic response characteristics of a projectile during ice-breaking water entry, numerical simulations were conducted for different projectile nose shapes and ice thicknesses, with particular emphasis on impact loads, ice-crack propagation, ice-fragment splashing, and post-entry cavity evolution. The results show that the projectile nose shape significantly influences the projectile-ice contact mode and energy-transfer process. As the nose shape changes from a flat nose to a progressively more streamlined ogive nose, the high-stress region and damaged area within the ice layer become increasingly concentrated around the penetration channel. Accordingly, the failure mode of the ice cover gradually shifts from global bending, radial crack propagation, and intense ice-fragment splashing to localized crushing and perforation. Meanwhile, both the peak axial acceleration and spectral amplitude of the projectile decrease, accompanied by a reduction in high-frequency components, indicating a transition of the impact load from strong transient loading to a smoother and more continuous loading process. With increasing ice thickness, the stiffness and local load-bearing capacity of the ice cover are enhanced, thereby suppressing crack propagation and ice-fragment splashing. At the same time, the reductions in projectile velocity and kinetic energy become more pronounced, while the peak axial acceleration and impact duration increase. After water entry, the flat-nosed projectile generates the largest cavity in the radial direction and induces the strongest free-surface disturbance, whereas the ogive-nosed projectile produces the slenderest cavity. However, under intermediate and thick ice conditions, cavity deflection and flow-field asymmetry become more pronounced for the ogive-nosed projectile. As the ice thickness increases, both the cavity size and the propagation range of pressure waves decrease, and cavity closure near the projectile tail occurs earlier. The findings provide important references for the structural design and safety assessment of trans-medium vehicles operating in polar ice-covered environments.

Keywords: water entry through an ice cover; load characteristics; ice-cover failure; crack evolution; flow field evolution