

航行体出水破冰的多场耦合效应与相似律¹⁾

岳军政* 吴先前*,²⁾ 黄晨光[†]

* (中国科学院力学研究所, 中国科学院流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

[†] (中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥 230031)

摘要 航行体出水破冰中的耦合效应及载荷特征, 是出水冰结构安全性评估的重要依据. 针对航行体出水破冰问题, 通过量纲分析, 获得了影响航行体动载荷及头部应力的主控参数和相似律. 基于 LS-DYNA 流固耦合计算方法, 得到了航行体在不同冲击速度、冰层厚度、冰层大小条件下的载荷特性. 计算结果表明, 航行体速度越大, 不同冰层对其过载和头部应力的影响差别越大, 这主要是因为航行体速度越大, 通过水介质对不同冰层的前期破坏程度不同. 对于无限大冰层, 当其厚度大于 3 倍航行体直径时, 航行体穿冰后期呈现稳定侵彻现象, 航行体的过载和头部应力只与航行体的速度和冰的动力学性能相关; 而对于薄冰, 航行体速度越大, 其头部应力反而越小, 这是因为航行体初速度越大, 其通过水的运动对冰的前期冲击破坏越严重, 冰层易开裂上鼓, 所以造成航行体头部应力较小. 对于径向尺寸为 6 倍航行体直径的碎冰, 当其厚度大于 5 倍航行体直径时, 碎冰对航行体运动特性的影响和无限大冰层几乎相同; 而当其厚度小于 3 倍的航行体直径时, 只有在初速度较低时, 碎冰的尺寸效应才可以忽略. 此外, 对比碎冰和无限冰层对航行体运动的影响可以看出, 越厚的冰受前期水的冲击破坏越小, 碎冰和无限冰层的影响规律基本一致; 而较薄的冰在前期水的冲击下破坏严重, 碎冰和无限冰层对航行体运动的影响都较小; 只有中等厚度的冰, 在较高冲击速度下碎冰和无限冰层才表现出径向尺寸效应相关的破坏程度, 如无量纲厚度为 3 的两种冰在航行体较高初速度 40 m/s 的条件下前期破坏差别较大, 导致后期对航行体运动特性的影响具有显著差异.

关键词 出水破冰, 多场耦合效应, 量纲分析, 相似律

中图分类号: O341 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-21-082

MULTI-FIELD COUPLING EFFECT AND SIMILARITY LAW OF FLOATING ICE BREAK BY VEHICLE LAUNCHED UNDERWATER¹⁾

Yue Junzheng* Wu Xianqian*,²⁾ Huang Chenguang[†]

* (Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

[†] (Institute of Physical Science, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract Fluid structure coupling effect and dynamic load characteristics are the important basis of the safety evaluation of the vehicle in the process of underwater launching and floating ice break. In this paper, the main control parameters which influence the dynamic load and the stress at the head of the vehicle, as well as the similarity law, are obtained by dimensional analysis. Based on the LS-DYNA fluid structure coupling method, the numerical simulations for

2021-03-01 收稿, 2021-05-10 录用, 2021-05-12 网络版发表.

1) 国家自然科学基金资助项目 (11772347, 12002349).

2) 吴先前, 副研究员, 主要研究方向: 爆炸与冲击动力学. E-mail: wuxianqian@imech.ac.cn

引用格式: 岳军政, 吴先前, 黄晨光. 航行体出水破冰的多场耦合效应与相似律. 力学学报, 2021, 53(7): 1930-1939

Yue Junzheng, Wu Xianqian, Huang Chenguang. Multi-field coupling effect and similarity law of floating ice break by vehicle launched underwater. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(7): 1930-1939

underwater launched vehicle impacting with floating ice have been conducted, and the load characteristics of the vehicle under the conditions of different impact velocities, different ice thicknesses and different ice sizes are obtained. The simulated results show that, the higher the initial velocity of the vehicle is, the greater the distinction of the influence of different ice targets on the overload and the stress at the head of the vehicle is, which is mainly due to the different destruction of different ice targets under the strong water impact generated by the underwater motion of the vehicle in the early stage. For the infinite ice sheet, when its thickness is more than 3 times the vehicle diameter, the penetration into the ice appears stable at the later stage, the rigid body acceleration and the stress at the head of the vehicle are only related to the penetration velocity and the dynamic mechanical properties of the ice; for the thinner ice target, the higher the velocity of the vehicle is, the smaller the stress at its head is. This is because the early damage of the ice under the water impact generated by the higher speed motion of the vehicle is more serious, the ice layer is easy to crack and bulge, resulting in the smaller stress at the vehicle head. For the broken ice whose radial dimension is 6 times the vehicle diameter, when its thickness is also greater than 5 times the vehicle diameter, the influence on the vehicle motion is almost the same as that of the infinite ice sheet; when its thickness is less than 3 times the diameter of the vehicle, the ice size effect can be ignored only when the vehicle velocity is low. In addition, by comparing the influence of broken ice and infinite ice on the vehicle motion, it can be observed that, the thicker ice got less damage by the water impact at the early stage, thus the influence of broken ice and infinite ice are basically the same; while the thinner ice is seriously damaged by the water impact, resulting in little influence of broken ice and infinite ice on the vehicle motion; only for the ice targets with medium thickness, their damage degrees are related to the radial size under the condition of the higher vehicle velocity, for instance, when the initial vehicle velocity is 40 m/s, there is a great damage difference between the two kinds of ice targets with dimensionless thickness 3 at the early stage, which leads to a significant difference in the influence on the vehicle motion at the later stage.

Key words underwater launching and ice break, multi-field coupling effect, dimensional analysis, similarity law

引言

高速航行体出水破冰具有重大的工程应用背景. 与常规水下发射过程相比, 航行体需要穿越水面覆盖冰层或穿越含冰块结构的冰水混合区域, 是一个涉及多相多介质动力耦合的复杂过程. 该过程中, 航行体的受载环境及弹道稳定性与在纯水介质出水过程有很大差别, 例如冰载荷的增加, 冰层受到冲击后复杂的断裂破碎行为, 都将直接导致航行体和冰面的受力分布发生剧烈变化, 增大出水冰发射的不确定性. 因此, 开展航行体出水破冰的动力学特征与载荷作用机理研究, 具有重要的应用价值和科学意义.

目前冰与结构相互作用的研究主要集中在冰的力学性能、船-冰碰撞方面, 而结构物穿冰作用的研究还较少. 在冰的力学性能方面, 温度和应变率是两个重要的影响因素^[1-6], 例如, Arakawa 和 Maeno^[1]的研究表明, 在准静态单轴压缩条件下, 0 ~ -100 °C 时, 多晶冰的抗压强度随着温度降低而升高, 但是温度在 -100 ~ -175 °C 时, 抗压强度并没有明显变化. Wu 和 Prakash^[7]通过分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 研究了冰的动态压缩

强度, 实验结果表明, 在 -15 ~ -125 °C 范围内降低温度时, 冰的强度从 32 MPa 增大到 112 MPa, 而在 -125 ~ -173 °C 范围内继续降低温度时, 强度大约为 110 ~ 120 MPa, 并无明显增强. 在应变率效应方面, Jones^[8]对温度 -11 °C 时应变率 $10^{-1} \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 范围内多晶冰力学性能的研究表明, 冰的强度随应变率的增大而增大, 并建立了压缩强度与应变率的近似关系式. 季顺迎等^[9]则结合 Hibler 黏塑性本构模型和 K-V 体黏弹性模型, 建立了海冰的黏弹塑性本构模型, 兼顾小应变率下的弹性以及大应变率下的塑性, 以模拟海冰的相互作用. Gao 等^[10]通过建立新的失效准则, 结合“Tsai-Wu”屈服模型建立了海冰的弹塑性本构模型, 以模拟船-冰山碰撞过程. 在冰的破碎失效方面, 静态和准静态压缩条件下, 冰的塑性应变可超过 0.1, 翼型裂纹萌生、扩展及导致的劈裂破坏是主要的失效机制. 随着应变率的增大, 冰表现出由韧转脆的现象^[11]. 在更高应变率条件下, 冰的失效模式以大块的劈裂转向了碎片和碎粒, Shazly 等^[12]采用 SHPB 对单晶和多晶冰在应变率 $60 \sim 1400 \text{ s}^{-1}$ 范围内的力学性能进行了研究, 实验中单晶和多晶冰均碎裂成很多细小颗粒, 并且冰失效后具有较高

的残余强度. Carney 等^[13]发展了高应变率下冰的失效模型. 冰载荷是船冰碰撞过程中的研究重点, 因此国内外学者对冰破坏的物理过程开展了大量的试验和数值模拟研究^[14-17]. 例如, Sodhi^[18]对冰层进行了小尺度压痕试验, 发现低压痕速度下冰发生延性变形, 主要是蠕变, 而高速下发生连续脆性压碎, 并且断裂前的冰变形大多是弹性的. 郭春雨等^[19]对冰区船舶在碎冰中的航行过程进行数值模拟, 获得的航行阻力和实验结果在定性上保持一致. 吴炜和黄焱^[20]通过开展冰水池模型试验, 研究了海冰漂移和船速对冰载荷分布的影响. 程文霞^[21]则通过在近场动力学模型中考虑爆炸破冰中的气泡载荷作用, 对涉及的载荷形式进行了分析.

目前关于航行体出水破冰的研究鲜有报道, 因此, 本文基于量纲分析, 系统地开展航行体出水破冰数值模拟, 研究冰-水-结构多介质耦合作用机理, 以获得航行体的运动特性及动载荷特征, 为复杂冰区环境下航行体的高速出水发射提供理论依据.

1 量纲分析

为了系统地开展数值模拟研究, 首先对航行体出水破冰多介质耦合过程(见图 1 示意图)进行量纲分析. 对于航行体的速度 v 、过载 a 以及头部应力 σ , 控制参数主要来自以下 5 个方面.

(1) 时间 t ;

(2) 冰的参数: 密度 ρ_i , 厚度 h_i , 弹性模量 E_i , 泊松比 ν_i , 极限应变 $\varepsilon_{i\max}$, 特征尺寸 l_i ;

(3) 水的参数: 密度 ρ_w , 声速 c_w ;

(4) 航行体与冰的初始距离 s ;

(5) 航行体参数: 密度 ρ_p , 弹性模量 E_p , 泊松比 ν_p , 长度 l_p , 直径 d_p , 初始速度 v_0 .

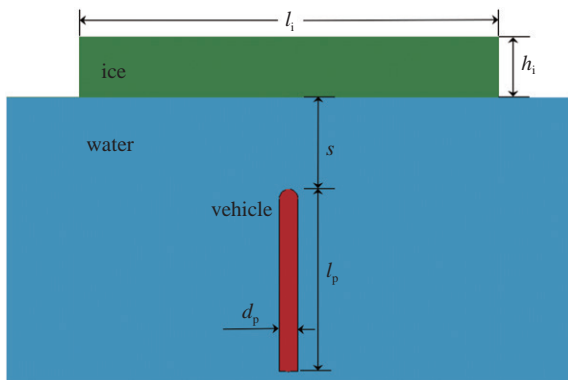


图 1 航行体出水破冰示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ice break by vehicle launched underwater

1.1 航行体速度 v

v 应当是上述 5 组控制参数的函数, 即

$$v = f(t; \rho_i, h_i, E_i, \nu_i, \varepsilon_{i\max}, l_i; \rho_w, c_w; s; \rho_p, E_p, \nu_p, l_p, d_p, v_0) \quad (1)$$

取 ρ_p , E_p 和 d_p 作为基本量, 式 (1) 可化为无量纲关系

$$\frac{v}{\sqrt{E_p/\rho_p}} = f\left(\frac{t}{d_p \sqrt{\rho_p/E_p}}; \frac{\rho_i}{\rho_p}, \frac{h_i}{d_p}, \frac{E_i}{E_p}, \nu_i, \varepsilon_{i\max}, \frac{l_i}{d_p}; \frac{\rho_w}{\rho_p}, \frac{c_w}{\sqrt{E_p/\rho_p}}; \frac{s}{d_p}; \nu_p, \frac{l_p}{d_p}, \frac{v_0}{\sqrt{E_p/\rho_p}}\right) \quad (2)$$

若材料不变, 并且保持航行体几何形状相似, 式 (2) 可简化为

$$\frac{v}{\sqrt{E_p/\rho_p}} = f\left(\frac{t}{d_p \sqrt{\rho_p/E_p}}; \frac{h_i}{d_p}, \frac{l_i}{d_p}; \frac{s}{d_p}; \frac{v_0}{\sqrt{E_p/\rho_p}}\right) \quad (3)$$

1.2 航行体过载 a

a 也是上述 5 组控制参数的函数, 并且若保持材料不变以及航行体几何形状相似, 函数有以下形式

$$\frac{a}{E_p/(\rho_p \cdot d_p)} = f\left(\frac{t}{d_p \sqrt{\rho_p/E_p}}; \frac{h_i}{d_p}, \frac{l_i}{d_p}; \frac{s}{d_p}; \frac{v_0}{\sqrt{E_p/\rho_p}}\right) \quad (4)$$

1.3 航行体头部应力 σ

σ 也是上述 5 组控制参数的函数. 同样地, 若材料不变, 并且保持航行体几何形状相似, 函数有以下形式

$$\frac{\sigma}{E_p} = f\left(\frac{t}{d_p \sqrt{\rho_p/E_p}}; \frac{h_i}{d_p}, \frac{l_i}{d_p}; \frac{s}{d_p}; \frac{v_0}{\sqrt{E_p/\rho_p}}\right) \quad (5)$$

为了验证上述推导的量纲分析结果, 采用 LS-DYNA 对两种不同参数条件下的航行体出水破冰工况分别进行了数值计算. 两种工况中保持材料相同以及航行体长径比 10 : 1 不变, 第一种工况航行体直径 $d_p = 10 \text{ mm}$ 、冰层厚度 $h_i = 3 \text{ cm}$ 、冰层为无限大冰层即 l_i 趋于无穷, 航行体与冰的初始距离 $s = 5 \text{ cm}$, 初始速度 $v_0 = 40 \text{ m/s}$; 第二种工况航行体的直径相对第一种增大 1/3, 即 $d_p = 13.33 \text{ mm}$, 其余量也相应增大或不变, 保持和第一种工况的无量纲参数相同. 采用的计算模型及方法具体在下文 2.1 介绍. 图 2 分别为计算的两种工况的无量纲航行体速度 v^* 、过载 a^* 以及头部应力 σ^* 随无量纲时间 t^* 的变化, 由图 2 可以看出, 两种工况的无量纲结果吻合得较好, 验证了上述推导的无量纲关系的正确性.

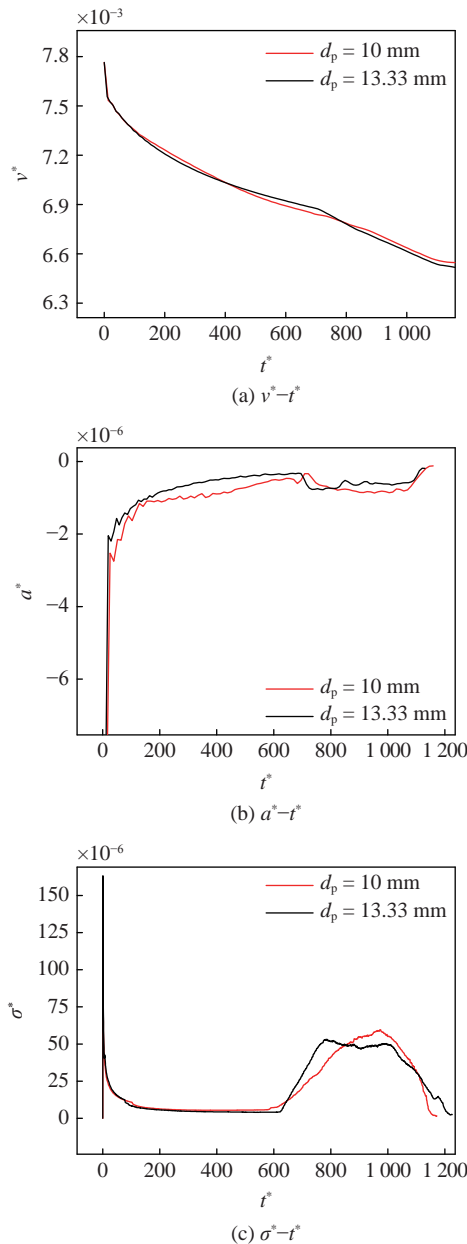


图 2 两种工况数值计算结果对比
(上角标*表示各参数对应的无量纲量)
Fig. 2 Comparison of the numerical results for the two cases
(superscript * denotes the dimensionless quantity)

由量纲分析可以看出,除了时间 t 外,影响航行体速度 v 、过载 a 和头部应力 σ 的因素主要为无量纲的冰厚度 h_i^* 、冰特征尺寸 l_i^* 、航行体与冰的初始距离 s^* 以及航行体初速度 v_0^* . 考虑到关于航行体水下运动的研究已经很多并且相关机制较为清楚^[22], 本文不着重于航行体的水下运动过程,在数值模拟研究中保持航行体与冰的初始距离 s^* 不变,重点关注其余 3 个因素的影响规律.

2 流固耦合计算方法

2.1 计算模型

考虑到问题的轴对称特性,建立 1/4 模型进行计算. 图 3 为计算模型以及局部的网格划分,模型包括航行体、水域、空气域以及冰层,均采用 Truegrid 进行六面体网格建模. 为了提高计算效率,对称轴附近的水、冰、空气采用精细网格,而外围部分采用较大的渐变网格. 在对称轴附近主要的流固耦合作用区域,水、冰的网格为 0.5 mm; 空气网格横向为 0.5 mm,轴向为 0.75 mm; 航行体的网格为水、冰网格的 1.6 ~ 1.7 倍,约 0.83 mm. 2.2 节给出了具体的网格无关性验证结果. 对称面上采用对称边界条件,水和空气域的外围以及上下面采用无反射边界条件. 对于冰层,无限大工况下在外围采用无反射边界条件,而碎冰情况下采用自由边界条件. 计算单位制采用 cm-g- μ s.

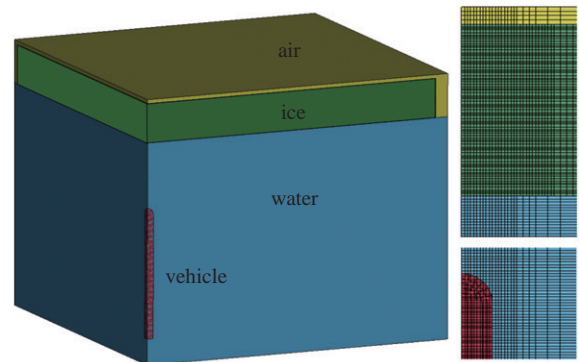


图 3 计算模型及局部网格划分 (不同工况内冰层尺寸不同)
Fig. 3 Full view of simulation components and part of meshed model
(ice sheet size is different in different cases)

各介质的计算域、计算模型以及参数分别列于下表 1 ~ 表 4 中. 固体介质航行体和冰采用拉格朗日 (Lagrangian) 算法,并且两者之间定义侵蚀面-面接触; 流体介质水和空气采用任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 算法. 通过 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 定义流固耦合关系. ALE 算法的控制方程为^[23]

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)_k = -\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} - c_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (6)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t}\right)_k = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i - \rho c_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

$$\left(\rho \frac{\partial e}{\partial t}\right)_k = \sigma_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} - \rho c_i \frac{\partial e}{\partial x_i} \quad (8)$$

式中, ρ 为密度, v_i 为拉格朗日坐标下的速度, σ_{ij} 为应力张量, f_i 为单位质量体力, c_i 为对流速度, q_i 为热通量, e 为内能.

表 1 冰计算模型及参数^[24]

Table 1 Ice details^[24]

Properties	Values
dimensions: infinite ice sheet	24 cm × 24 cm × h_i
dimensions: broken ice	6 cm × 6 cm × h_i
density	897 kg/m ³
Young's modulus	9.31 GPa
maximum pressure	9.2 MPa
minimum pressure	-0.92 MPa
element type	*SECTION_SOLID (brick)
typical element size	0.5 mm
material properties	*MAT_ELASTIC, *MAT_ADD_EROSION

* h_i is the height of the ice target, and the infinite ice sheet model uses the non-reflecting boundary.

表 2 航行体计算模型及参数

Table 2 Vehicle details

Properties	Values
dimensions	1 cm diameter, 10 cm length and spherical head
initial vehicle-ice separation, s	5 cm
density	7800 kg/m ³
Young's modulus	207 GPa
yield strength	2.1 GPa
element type	*SECTION_SOLID (brick)
typical element size	0.83 mm
material properties	*MAT_PLASTIC_KINEMATIC

表 3 水计算模型及参数^[25]

Table 3 Water box details^[25]

Properties	Values
dimensions	25 cm × 25 cm × 17 cm
density	1000 kg/m ³
element type	*SECTION_SOLID (brick)
typical element size	0.5 mm
material properties	*MAT_NULL, *EOS_GRUNEISEN

由于冰体在高应变率载荷下呈现脆性, 因此参考文献 [24-25], 冰采用弹脆性模型以及失效算法^[24], 航行体材料采用 DT300 钢, 水、空气分别采用标准

表 4 空气计算模型及参数^[25]

Table 4 Air box details^[25]

Properties	Values
dimensions	25 cm × 25 cm × h_a
density	1.25 kg/m ³
element type	*SECTION_SOLID (brick)
typical element size	0.5 mm, 0.75 mm
material properties	*MAT_NULL, *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL

* h_a is the height of the air domain, and is bigger than the height of the ice target h_i .

大气压下的参数^[25].

本文中水采用 Gruneisen 状态方程^[23], 其表达式如式 (9) 所示, 具体参数列于表 5 中. 空气采用线性多项式状态方程^[23], 表达式如式 (10) 所示, 具体参数列于表 6 中.

$$p = \begin{cases} \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a \mu) E, & \mu \leq 1 \\ \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a \mu) E, & \mu > 1 \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\mu = \rho / \rho_0 - 1$, ρ 和 ρ_0 分别为水的密度和初始密度. C 为 $v_s(v_p)$ 曲线的截距, $S_1 \sim S_3$ 是 $v_s(v_p)$ 曲线斜率的无量纲系数, γ_0 为常数, E 为比内能.

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (10)$$

式中, $\mu = \rho / \rho_0 - 1$, $C_0 \sim C_6$ 是与气体性质有关的常数, E 为比内能, ρ 和 ρ_0 分别为空气的密度和初始密度.

表 5 水的 Gruneisen 状态方程参数

Table 5 Gruneisen EOS parameters for water

$C / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	S_1	S_2	S_3	γ	a
1520	1.92	0	0	0.28	0

表 6 空气线性多项式状态方程参数

Table 6 Polynomial EOS parameters for air

C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$E / (\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$
0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.53×10^5

2.2 网格无关性验证

为了验证计算网格的无关性, 将 2.1 节表格所列的网格均缩小为原来的 0.75 倍, 分别采用这两套网

格, 对初速度 40 m/s 的航行体出水破冰 (3 cm 厚无限冰层) 进行了数值计算。

图 4 为计算的航行体速度以及加速度的变化历史, 由图 4 可以看出, 无论是水中运动还是破冰过程, 两套网格计算的结果基本一致, 表明可以采用表 1~表 4 所列的以 0.5 mm 为主的一套网格进行数值计算。

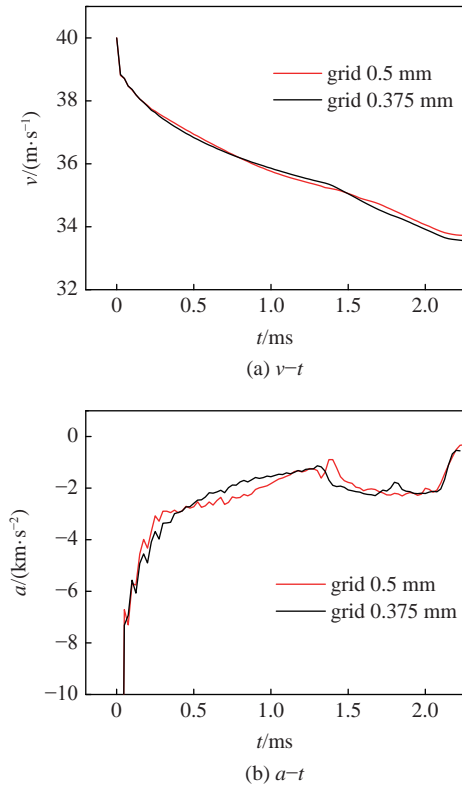


图 4 不同网格计算的航行体速度和加速度变化
Fig. 4 Simulated vehicle speed history and acceleration history by different grid sizes

3 计算结果与分析

基于量纲分析, 本文针对表 2 所示航行体, 并且保持航行体与冰的初始距离 $s = 5 \text{ cm}$ 不变, 通过改变航行体初始发射速度 v_0 、冰的厚度 h_i 以及冰的尺寸 l_i (具体值列于表 7 中), 对 18 种不同工况的航行体出水破冰进行了数值模拟。

表 7 不同工况计算条件

Table 7 Calculation conditions for different cases

Parameters	Value
initial velocity of vehicle, $v_0/(m \cdot s^{-1})$	20, 30, 40
ice thickness, h_i/cm	1, 3, 5
ice size/(cm×cm)	infinite, 6×6

图 5 分别为计算的不同冰层条件下初速度 40 m/s 的航行体的速度变化和加速度变化历史. 由图 5 可以看出, 当航行体在水中的运动流场稳定后, 其加速度约 200g~300g. 约 1.15 ms 时刻, 航行体撞击冰层, 此时航行体的速度为 35.6 m/s. 对于无限大的冰层, 1 cm 厚的冰并没有对航行体造成较明显的载荷, 和在水中运动时的速度衰减趋势基本相同, 航行体穿冰后的剩余速度约 34.8 m/s; 而对于 3 cm 和 5 cm 厚的冰层, 它们对航行体造成的平均加速度约 220g, 其中的细小差距是由于冰层的破碎形态不同造成的, 航行体穿越 3 cm 冰层后的剩余速度约 33.7 m/s, 而穿越 5 cm 冰层后的剩余速度约 32.8 m/s.

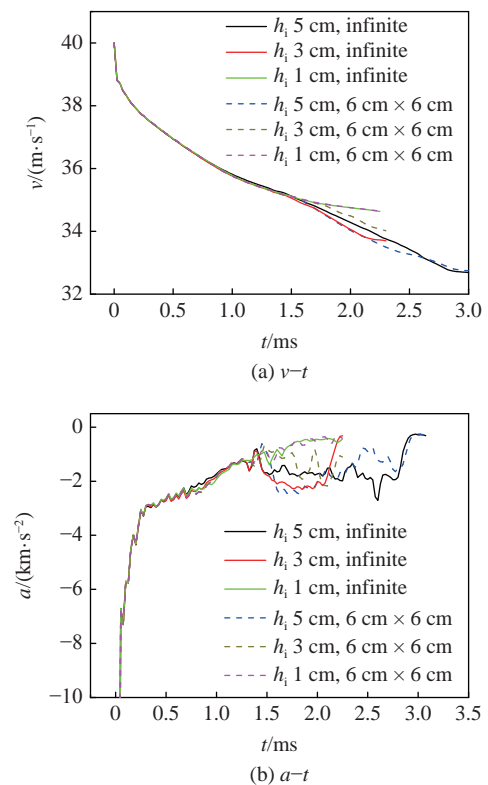


图 5 不同冰层时初速度 40 m/s 的航行体的速度和加速度变化
Fig. 5 Speed and acceleration history for 40 m/s vehicle impacting with different ice targets

对于尺寸为 6 cm×6 cm 的碎冰, 当冰厚度为 1 cm 或 5 cm 时, 其对航行体运动的影响和无限大冰层基本相同, 只有瞬时的加速度会因为冰的破碎不同有一定差别; 而对于 3 cm 厚的碎冰, 其对航行体速度和加速度的影响不及无限冰层, 平均加速度约 180g, 航行体剩余速度约 34.3 m/s. 这是因为, 对于较厚的冰, 无论是无限大冰层还是碎冰, 在水的冲击作用下损伤较小, 因此航行体撞击前其完整性均较好, 两者对航行体运动特性的影响差别不大; 而对于较薄的

冰,无论是无限大冰层还是碎冰,在水的冲击作用下几乎完全断裂破碎,因此对航行体运动特性的影响都很小,冰的尺寸效应也不明显.只有对于 3 cm 厚的冰,水对无限大冰层或碎冰的冲击破坏程度区别较大,导致两者后续与航行体的撞击作用出现明显差别.

图 6 为计算的初速度 40 m/s 的航行体撞击不同冰层时头部的应力变化历史.对于无限大冰层,航行体撞击 1 cm 厚的冰产生的最大头部应力仅有 2.2 MPa,这是薄冰在撞击前损伤较大的缘故.撞击 3 cm 和 5 cm 厚的无限大冰层时,产生的最大头部应力基本相同,约 12.3 MPa,且在穿越 5 cm 厚的冰时,出现约 1 ms 的稳定侵彻阶段,以上现象表明:当无限大冰层超过 3 cm 厚时,航行体头部应力只和其速度有关,而和冰的厚度无关.对于大小为 6 cm × 6 cm 的碎冰,当厚度为 1 cm 或 5 cm 时,其在航行体头部产生的最大应力和无限大冰层基本相同,而厚度为 3 cm 时,相对无限大冰层,碎冰产生的最大头部应力较小,仅有 7.5 MPa.

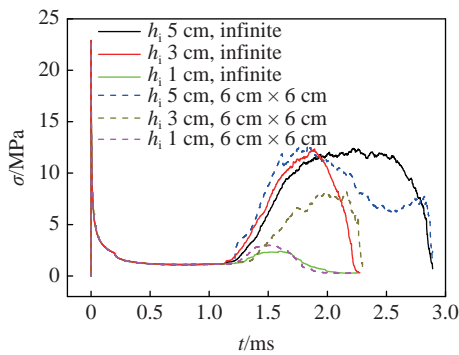
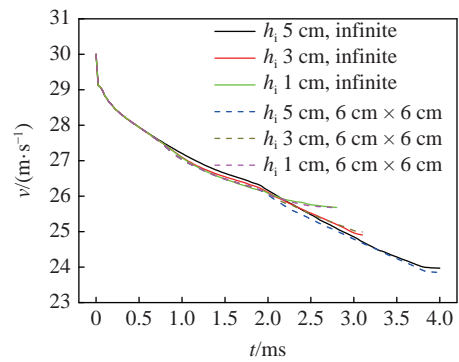


图 6 不同冰层时初速度 40 m/s 的航行体的头部应力历史
Fig. 6 Stress history at the 40 m/s vehicle head with different ice targets

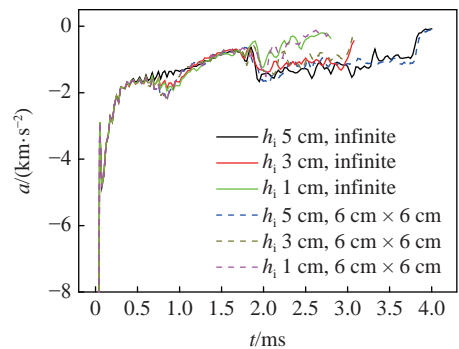
图 7(a),图 7(b) 分别为计算的初速度 30 m/s 的航行体的速度变化和加速度变化历史.当航行体在水中的运动流场稳定后,其加速度约 90g ~ 180g.约 1.65 ms 时刻,航行体撞击冰层,此时航行体的速度为 26.6 m/s.由图 7 中计算结果可以看出,对于 3 cm 和 5 cm 厚的冰,无论是无限冰层还是 6 cm × 6 cm 碎冰,它们对航行体速度和加速度的影响基本相同,加速度约 130g,呈现稳定侵彻现象,航行体穿越 5 cm 冰层后的剩余速度约 24 m/s,穿越 3 cm 冰层后的剩余速度约 24.9 m/s.而 1 cm 厚的无限大冰层或碎冰,对航行体运动特性的影响均较小,加速度仅有 100g,航行体穿冰后的剩余速度约 25.7 m/s.

图 8 为计算的不同冰层条件下初速度 30 m/s

的航行体的头部应力变化历史.由计算结果可以看出,对于 5 cm 厚的无限大冰层、碎冰以及 3 cm 厚的无限大冰层,它们在航行体头部造成的平均应力基本相同,约 7.7 MPa,明显低于初速度 40 m/s 时的最大应力 12.3 MPa,并且 3 cm 厚的碎冰可以造成相当的最大头部应力,只是其应力脉冲略小;而对于 1 cm 厚的无限大冰层或碎冰,其在航行体头部产生的最大应力为 3.8 MPa,高于初速度 40 m/s 时的最大应力 2.2 MPa,这是因为对于 1 cm 厚的薄冰,航行体速度越大,其通过水的运动冲击越容易使冰层中间开裂上鼓,所以造成航行体的头部应力较小.



(a) v-t



(b) a-t

图 7 不同冰层时初速度 30 m/s 的航行体的速度和加速度变化

Fig. 7 Speed and acceleration history for 30 m/s vehicle impacting with different ice targets

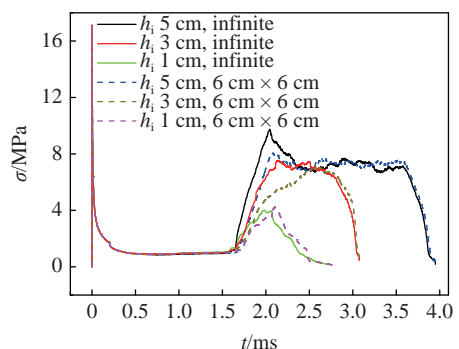


图 8 不同冰层时初速度 30 m/s 的航行体的头部应力历史

Fig. 8 Stress history at the 30 m/s vehicle head with different ice targets

图 9(a), 图 9(b) 分别为计算的初速度 20 m/s 的航行体的速度变化和加速度变化历史. 航行体在水中的运动流场稳定后, 其加速度约 50g ~ 90g. 约 2.45 ms 时刻, 航行体撞击冰层, 此时航行体的速度为 17.3 m/s. 由计算结果可以看出, 不同厚度冰层对航行体加速度的影响差别较小, 平均加速度约 60g ~ 80g. 无论对于碎冰还是无限冰层, 航行体穿越 1 cm, 3 cm 和 5 cm 冰层后的剩余速度分别为 16.7 m/s, 16.3 m/s 和 15.8 m/s.

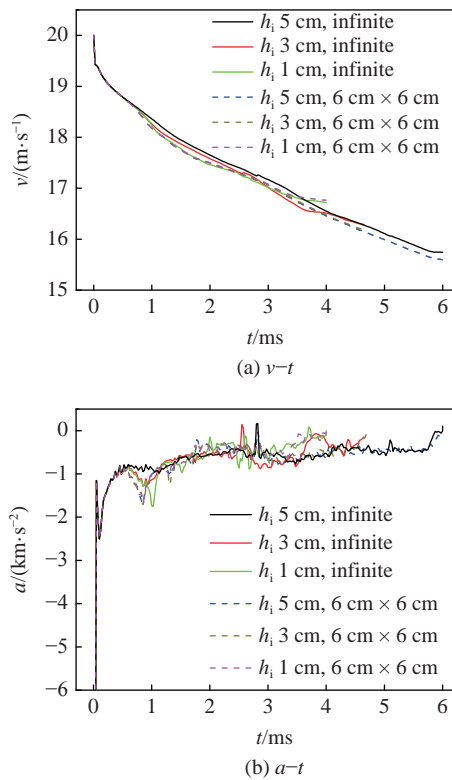


图 9 不同冰层时初速度 20 m/s 的航行体的速度和加速度变化
Fig. 9 Speed and acceleration history for 20 m/s vehicle impacting with different ice targets

图 10 为计算的初速度 20 m/s 的航行体撞击不同冰层时头部的应力变化历史. 由计算结果可以看出, 对于低速撞击, 不同厚度冰层对航行体头部造成的最大应力基本相同, 约 4.5 MPa, 仅有 1 cm 厚碎冰造成的头部应力较小, 只有 3.1 MPa, 表明航行体在该速度下的水下运动对 1 cm 厚的无限冰层和碎冰造成的前期破坏不同. 值得注意的是, 1 cm 厚的无限冰层造成的航行体头部最大应力高于初速度 40 m/s 和 30 m/s 时的结果, 这同样是由于对于薄冰, 航行体初速度越小, 其通过水的运动对冰层中间的前期破坏越小, 致使其头部应力较大.

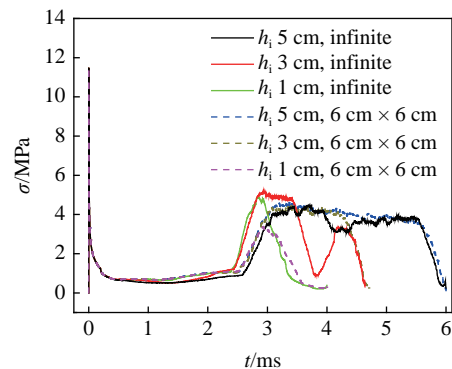


图 10 不同冰层时初速度 20 m/s 的航行体的头部应力历史
Fig. 10 Stress history at the 20 m/s vehicle head with different ice targets

图 11 为初速度 30 m/s 的航行体出水穿越 3 cm 厚无限冰层时不同时刻的应力分布, 为了清晰可见, 隐去了水和空气流体介质单元, 仅显示航行体和冰层固体单元. 由图 11 可以看出, 1 ms 时刻, 由于航行体高速运动引起周围的水介质向上运动, 导致冰内部出现应力, 并且由于局部单元失效出现裂纹; 2.2 ms 时刻, 冰层断裂为碎冰块, 此刻航行体头部已

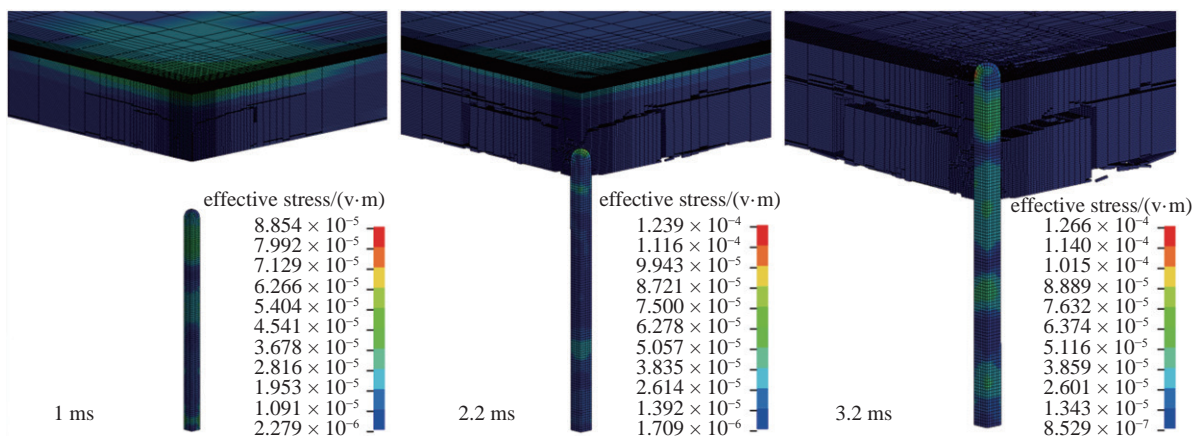


图 11 初速度 30 m/s 的航行体撞击 3 cm 厚冰层不同时刻的应力分布
Fig. 11 Stress distribution of vehicle with initial velocity 30 m/s and 3 cm thick ice target at different time

进入冰层, 出现稳定的侵彻阶段; 3.2 ms 时刻, 航行体头部已完全穿出冰层, 此时冰内应力已经很小, 仅有航行体内部应力波的传播和衰减.

图 12 分别为不同工况下航行体的无量纲最大过载和最大头部应力随无量纲初始发射速度的变化情况. 由计算结果可以看出, 航行体速度越大, 不同冰层对其过载和头部应力的影响差别越大, 这主要是因为航行体速度较大时, 不同冰层受到的前期破坏程度不同. 从碎冰和无限冰层尺寸效应来看, 无量纲厚度 h_i^* 为 3 的两种冰对高速航行体的过载和头部应力的影响差别较大, 而无量纲厚度 h_i^* 为 1 和 5 的碎冰与同厚度无限冰层的影响差别均较小. 当冰层较厚、较大时, 航行体速度越大, 其过载和头部应力越大; 而对于较薄的冰层, 由于其前期破坏较严重, 所以航行体过载随速度增大而增大的趋势相对较小, 尤其对航行体头部应力的影响规律性较差.

纲分析, 获得了影响航行体动载荷及其头部应力的主控参数和相似律. 利用 LS-DYNA, 对不同初速度的航行体出水穿越不同冰层进行了数值模拟研究, 获得了其动力学载荷特性及作用机理. 计算结果表明, 航行体速度越大, 通过水介质对不同冰层的前期破坏差别越大, 导致冰-水-结构耦合作用的影响效果差异明显. 对于较厚的冰层, 航行体穿冰后期呈现稳定的侵彻现象, 航行体的载荷特征仅与其速度和冰的动态力学性能相关. 对于较薄的冰层, 需要考虑其撞击前的破坏程度. 对于中等厚度的冰, 在较高冲击速度下才表现出径向尺寸效应相关的载荷作用机制, 低速条件下, 径向尺寸大于 6 倍航行体直径的碎冰和无限大冰层的影响效果基本相同. 本文研究结果可为冰区环境下航行体的出水发射提供理论参考.

参 考 文 献

- 1 Arakawa M, Maeno N. Mechanical strength of polycrystalline ice under uniaxial compression. *Cold Regions Science and Technology*, 1997, 26: 215-229
- 2 Schulson EM, Iliescu D, Fortt A. Characterization of ice for return-to flight of the space shuttle: Part i-hard ice. *NASA Contractor Report*, 2005: 213643
- 3 Dutta PK, Cole DM, Schulson EM, et al. A fracture study of ice under high strain rate loading. *Internatioanl Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2004, 14(3): 182-188
- 4 Kim H, Keune JN. Compressive strength of ice at impact strain rates. *Journal of Materials Science*, 2007, 42: 2802-2006
- 5 Stewart ST, Ahrens TJ. Shock properties of H₂O ice. *Journal of Geophysical Research*, 2005, Planets 110: E03005
- 6 Wu X, Prakash V. Dynamic strength of distill water and lake water ice at high strain rates. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 76: 155-165
- 7 Wu X, Prakash V. Dynamic compressive behavior of ice at cryogenic temperatures. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 118: 1-13
- 8 Jones SJ. High strain-rate compression tests on ice. *Journal of Physical Chemistry B*, 1997, 101(32): 6099-6101
- 9 季顺迎, 岳前进, 姚征. 渤海海冰动力学中的黏弹塑性本构模型. *水科学进展*, 2002, 13(5): 599-604 (Ji Shunying, Yue Qianjin, Yao Zheng. Viscous-elastic-plastic constitutive model for sea ice dynamics in the Bohai Sea. *Advances in Water Science*, 2002, 13(5): 599-604 (in Chinese))
- 10 Gao Y, Hu Z, Ringsberg JW, et al. An elastic-plastic ice material model for ship-iceberg collision simulations. *Ocean Engineering*, 2015, 102: 27-39
- 11 Schulson EM, Duval P. *Creep and Fracture of Ice*. New York: Cambridge University Press, 2009
- 12 Shazly M, Prakash V, Lerch BA. High strain-rate behavior of ice under uniaxial compression. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, 46(6): 1499-1515

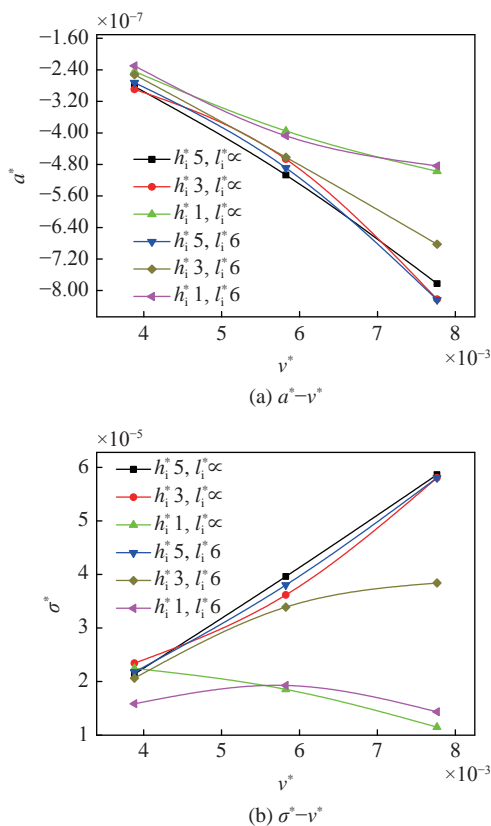


图 12 不同冰层时航行体最大过载与最大头部应力随速度的变化
Fig. 12 Variation of maximum overload and head stress of vehicle with speed for different ice targets

4 结 论

本文针对航行体出水破冰的应用背景, 通过量

- 13 Carney KS, Benson DJ, DuBois P, et al. A phenomenological high strain rate model with failure for ice. *International Journal of Solids and Structures*, 2006(43): 7820-7839
- 14 徐莹, 胡志强, 陈刚等. 船冰相互作用研究方法综述. 船舶力学, 2019, 23(1): 110-124 (Xu Ying, Hu Zhiqiang, Chen Gang, et al. Overview of the investigating methods for ship-ice interaction analysis. *Journal of Ship Mechanics*, 2019, 23(1): 110-124 (in Chinese))
- 15 Jones SJ, Gagnon RE, Derradji A, et al. Compressive strength of ice-berg ice. *Canadian Journal of Physics*, 2003, 81(1-2): 191-200
- 16 马健钧. 海冰弯曲破坏的数值模拟方法研究 [硕士论文]. 天津: 天津大学, 2013 (Ma Jianjun. Methodology research on the numerical simulation of the bending failure of sea ice [Master Thesis]. Tianjin: Tianjin University, 2013(in Chinese))
- 17 Xu Y, Hu ZQ, Ringsberg JW, et al. Nonlinear viscoelastic-plastic material modelling for the behaviour of ice in ice-structure interactions. *Ocean Engineering*, 2019, 173: 284-297
- 18 Sodhi DS. Crushing failure during ice-structure interaction. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 68(17): 1889-1921
- 19 郭春雨, 李夏炎, 王帅等. 冰区航行船舶碎冰阻力预报数值模拟方法. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(2): 145-156 (Guo Chunyu, Li Xiayan, Wang Shuai, et al. A numerical simulation method for resistance prediction of ship in pack ice. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, 37(2): 145-156)
- 20 吴炜, 黄焱. 考虑海冰漂移的船舶冰载荷分布模型试验. 船舶力学, 2021, 25(2): 166-174 (Wu Wei, Huang Yan. Model tests on ice load distribution of an icebreaker under drifting ice. *Journal of Ship Mechanics*, 2021, 25(2): 166-174 (in Chinese))
- 21 程文霞. 基于近场动力学的冰下爆炸破冰数值模拟研究. [博士论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019 (Cheng Wenxia. Research on numerical simulation of ice breaking by under ice explosion based on peridynamics. [PhD Thesis]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019(in Chinese))
- 22 王一伟, 黄晨光. 高速航行体水下发射水动力学研究进展. 力学进展, 2018, 48: 201805 (Wang Yiwei, Huang Chenguang. Research progress on hydrodynamics of high speed vehicles in the underwater launching process. *Advances in Mechanics*, 2018, 48: 201805 (in Chinese))
- 23 Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA User 's Manual (960v), Volume III (Structured Format). 2001
- 24 张忠和, 梁向前, 王树理. 水下爆破破冰机理的数值分析研究. 爆破, 2015, 32(3): 150-155 (Zhang Zhonghe, Liang Xiangqian, Wang Shuli. Numerical simulation of ice breaking mechanism of underwater blasting. *Blasting*, 2015, 32(3): 150-155 (in Chinese))
- 25 Gagnon RE, Wang J. Numerical simulations of a tanker collision with a bergy bit incorporating hydrodynamics, a validated ice model and damage to the vessel. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 81: 26-35