

DOI: 10.7511/jslx20231121001

# 冰块尺寸对碎冰区船舶结构冰阻力影响的离散元分析

张鑫奥<sup>1</sup>, 俞 贇<sup>2</sup>, 杨冬宝<sup>1</sup>, 刘 璐<sup>3</sup>, 季顺迎<sup>\*1</sup>

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 大连 116024;

2. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011; 3. 大连理工大学 船舶工程学院, 大连 116024)

**摘 要:** 船舶在碎冰区航行时的冰阻力会影响船舶的安全性和航行性能。本文以雪龙号破冰船为研究对象, 采用三维离散元方法对碎冰环境下船体结构冰阻力进行数值模拟。基于随机生成算法对不规则形状的碎冰区进行参数化建模以形成复杂的碎冰初始场, 同时考虑海水对船体结构的作用力建立船体碎冰阻力的计算模型, 并将离散元计算结果与碎冰区 DuBrovin 冰阻力计算公式进行对比。在此基础上将冰块尺寸进行无量纲化, 研究不同冰厚和航速下冰块尺寸对碎冰阻力的影响规律。以平整冰区船体冰阻力的 Lindqvist 公式为参照, 得到碎冰向平整冰转化的临界尺寸。该浮冰临界尺寸可作为识别碎冰区与平整冰的判据。本文研究工作可为船舶在极地冰区的安全航行提供一定的参考。

**关键词:** 破冰船; 离散元方法; 碎冰区; 冰块尺寸; 冰阻力

**中图分类号:** O347.7; O373

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-4708(2024)05-0915-06

## 1 引言

近年来,受全球气候变化趋势的影响,北极海冰覆盖面积和厚度都在不断减少<sup>[1]</sup>,海冰也更多地以碎冰的形式出现。根据海冰的形状特征及形成机理可将海冰划分为碎冰、平整冰和冰脊等,与其他海冰类型相比,碎冰表现出更多的不确定性和随机性。船舶与碎冰之间相互作用过程的复杂性使船舶冰阻力的预测变得十分困难。

针对船舶与碎冰的相互作用过程,目前国内外主要研究方法有理论分析<sup>[2]</sup>、模型试验<sup>[3-6]</sup>和数值模拟。数值模拟方法在确定冰阻力时具有效率高和成本低的优点<sup>[7]</sup>。针对碎冰区冰块的离散分布特性以及受力进一步破碎的规律,离散元方法更广泛地应用于碎冰区冰阻力的数值计算,并相继建立了三维圆盘<sup>[8]</sup>、粘接球体单元<sup>[9]</sup>和扩展多面体单元<sup>[10]</sup>等不同的离散元方法以更加准确地描述碎冰的几何形态和动力过程。

目前对于碎冰区船体冰阻力的影响参数研究

主要有航速、海冰密集度、冰厚和碎冰形状<sup>[11]</sup>,但是对冰块尺寸的研究相对较少。目前碎冰区的模型试验和数值模拟大多不考虑冰块的再次破坏,且碎冰的几何形状相对规则<sup>[12]</sup>。为合理确定碎冰区的船舶阻力特性,需要建立冰块的几何形态与真实冰况一致的初始碎冰区。一般采用直接观测法构建碎冰区,其可利用航拍或卫星遥感直接获取碎冰区域图像<sup>[13]</sup>。此外,基于二维 Voronoi 图形切割算法也可构造初始碎冰区<sup>[14]</sup>。为得到形态各异和大小差异较大的碎冰区,也可采用随机碎冰区生成算法<sup>[15]</sup>。

在自然条件下,受到风、流等因素的作用,碎冰尺寸从几厘米到上千米不等。船舶在较小尺寸碎冰区航行时,碎冰与船体碰撞不会发生破碎。随着冰块尺寸的增加,船舶冰阻力会不断增大,并导致大块碎冰的破坏。在冰块尺寸由小到大的变化过程中,船体冰阻力的定量渐变规律是目前国内外关注的问题。

为此,本文采用具有粘接-破碎的球体离散元

收稿日期:2023-11-21; 修改稿收到日期:2023-12-23.

基金项目:国家自然科学基金(42176241; U20A20327); 工信部极地船舶专项(CBG2N21-2-3)资助.

作者简介:季顺迎<sup>\*</sup>(1972-),男,博士,教授(E-mail:jisy@dut.edu.cn).

引用本文:张鑫奥,俞 贇,杨冬宝,等. 冰块尺寸对碎冰区船舶结构冰阻力影响的离散元分析[J]. 计算力学学报, 2024, 41(5): 915-920.  
ZHANG Xin-ao, YU Bin, YANG Dong-bao, et al. Influence of ice floe size on ice resistance of ship hull in broken ice field based on discrete element analysis[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(5): 915-920.

方法,对不同尺寸碎冰区的船体冰阻力进行数值分析,探究冰块尺寸对冰阻力的影响规律,确定不同冰厚及航速下碎冰区向层冰区转化的冰块临界尺寸,为船舶在冰区安全航行提供参考依据。

## 2 随机碎冰区的离散元生成

船舶在碎冰区航行时,合理构造碎冰区是对船舶冰阻力进行准确预报的重要基础。为考虑碎冰几何形状和空间排布的随机性,下面采用随机碎冰区生成方法对离散元碎冰区进行构建。

### 2.1 二维随机碎冰区的快速构建

在构建碎冰区时,将碎冰区域划分为  $N$  个区间。在第  $i$  个区间的最大尺寸  $D_{\max}^i$  和最小尺寸  $D_{\min}^i$  可表示为

$$D_{\min}^i = D_{\max} - i[(D_{\max} - D_{\min})/N] \quad (1)$$

$$D_{\max}^i = D_{\max} - (i-1)[(D_{\max} - D_{\min})/N] \quad (2)$$

依据碎冰块的尺寸要求,以  $D_{\min}^i$  为边长,建立图 1(a)所示的正方形。为防止多边形过于扭曲,在每个角点处设置余量  $t$ 。在每条边上分别随机选取距角点大于  $t$  的一个点,然后再以角点为顶点,按顺序连接形成新的四边形,如图 1(b)所示。当多边形边数大于 4 时,选取四个顶点的任意一点,并在其相邻两边随机选取两点,如图 1(c)中绿色点,并切除与原顶点之间的部分,再循环选取随机点,直到满足冰块顶点的数量要求。

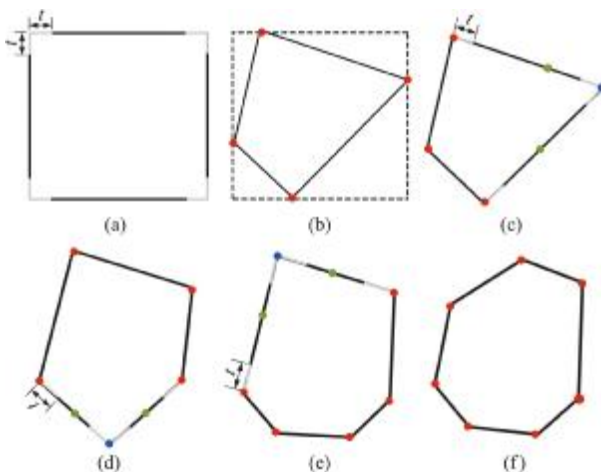


图 1 碎冰多边形生成过程

Fig. 1 Process of generating a floe ice polygon

构造多个任意形态碎冰块后,再将其随机投放到碎冰区的计算域内。为避免碎冰块之间以及碎冰块与边界之间的重叠,在碎冰块构造和投放时需要对碎冰单元进行接触检测。在  $500 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  的碎冰区范围内,控制冰块尺寸范围为  $5.0 \text{ m} \sim 15.0 \text{ m}$ ,初始密集度为  $70\%$ ,生成的碎冰区初始场如图 2 所示。

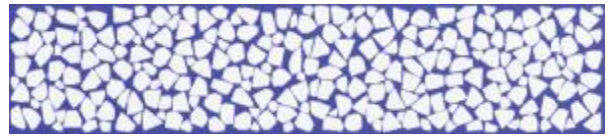


图 2 多边形碎冰区的随机分布

Fig. 2 Random distribution of polygonal broken ice field

### 2.2 三维碎冰区的构建

在生成二维碎冰区轮廓后,对其可采用三维球体离散单元按照六方最密堆积方式进行填充。根据设定的碎冰厚度和颗粒层数可确定球体单元直径,如图 3 所示。充分考虑单块碎冰内球体单元之间的平行粘结对效应,通过拉剪分区断裂准则判断海冰单元之间的粘结失效特性,以此模拟海冰的破坏过程<sup>[16,17]</sup>。

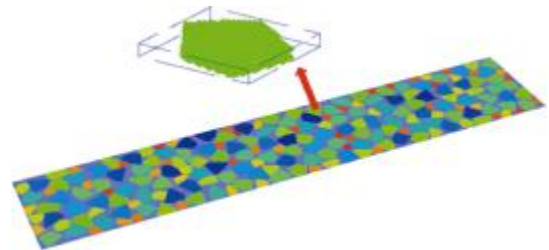


图 3 随机碎冰区的球体离散元填充

Fig. 3 Random broken ice field with spherical discrete elements

## 3 碎冰区冰阻力的离散元模拟

采用构造的随机初始冰区,并考虑冰块的浮力、拖曳力、冰块间碰撞及其与船体的相互作用,可对船舶结构冰阻力进行离散元计算。

### 3.1 碎冰区的 DEM 数值模型

以雪龙号极地科学考察船为研究对象,对其以恒定速度在碎冰区航行时的冰阻力进行离散元分析。船体主要尺寸和离散元计算参数列入表 1。

表 1 船舶尺寸及离散元数值模拟计算参数

Tab. 1 Ship dimensions and computational parameters in DEM numerical simulations

参数	符号/单位	数值
排水量	T/kt	20.0
船体长度	L/m	167.0
船体宽度	B/m	22.6
吃水深度	H/m	9.0
艏柱倾角	$\varphi/^\circ$	24.0
艏部水线进角	$\alpha/^\circ$	20.0
海冰弹性模量	E/GPa	1.0
海冰密度	$\rho_{\text{ice}}/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	920.0
海冰弯曲强度	$\sigma_f/\text{MPa}$	0.7
海冰泊松比	$\nu$	0.3
海水密度	$\rho_w/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1035.0
碎冰尺寸	d/m	50.0

本文将船体划分为三角形单元,通过与球体单元接触,计算碎冰与船体之间的相互作用,从而得到船体冰阻力<sup>[18]</sup>。

取碎冰区计算域为 1200 m×800 m。当冰厚  $h=1.0$  m,海冰密集度  $C=50\%$ ,航速  $V=2.0$  m/s 时,对船舶在碎冰区的航行过程进行离散元计算。图 4 和图 5 分别为船与碎冰相互作用过程和冰阻力时程曲线。从图 5 可以看出,船体冰阻力呈现出很强的随机特性,可很好地反映出船体与每个碎冰块碰撞时的脉动特性。为分析该冰况下的最大冰阻力,本文将冰阻力时程中的 54 个峰值进行提取并标示于图 5 中。该冰阻力峰值的均值  $F_{ice}=330.6\pm 160.4$  kN。

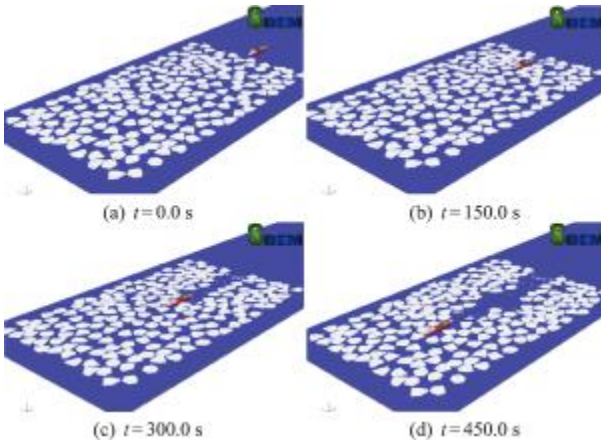


图 4 船舶与碎冰相互作用过程的离散元模拟

Fig. 4 Interaction processes between ship and broken ice simulated with DEM

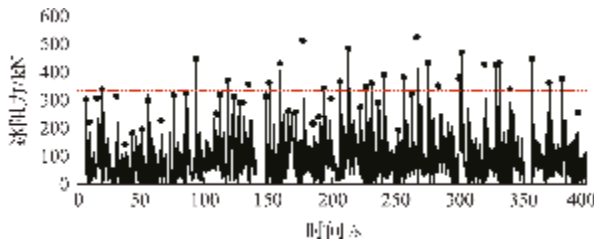


图 5 碎冰区船舶结构冰阻力时程曲线

Fig. 5 Time history of ice resistance of ship hull in broken ice field

依据碎冰区模型试验结果,船舶结构冰阻力的 DuBrovin 经验公式为<sup>[19]</sup>

$$R_{ice} = p_1 A + p_2 \phi Fr^n \quad (3)$$

式中  $R_{ice}$  为冰阻力,  $Fr=V/(gL)^{1/2}$  为弗劳德数,  $p_1$  和  $p_2$  为与碎冰密集度和航道宽度等条件有关的经验参数,  $n$  为与船型有关的幂指数。其中参数  $A$  和  $\phi$  定义为

$$A = \frac{1}{4} B^2 \sqrt{r h_i} \rho_i \left( 1 + 2 \frac{L}{B} f_0 \alpha_H \right) \quad (4)$$

$$\phi = d h_i \rho_i B \left[ f_0 + \tan \alpha_0 \left( \alpha_H + \frac{L}{B} \tan \alpha_0 \right) \right] \quad (5)$$

式中  $L$  和  $B$  分别为船舶的长度和宽度,  $d$  为碎冰直径,  $h_i$  为碎冰厚度,  $\rho_i$  为海冰密度,  $f_0$  为船体和碎冰之间的摩擦系数,  $\alpha_H$  为船舶前体的菱形系数,  $\alpha_0$  为船艏进水角的 1/2。

在不同航速下船舶冰阻力经验公式和 DEM 模拟的冰阻力计算结果如图 6 所示。可以看出,离散元数值模拟结果与 DuBrovin 经验公式的冰阻力计算结果趋势一致。在低速阶段船舶与碎冰作用主要是受到碎冰堆积和滑移的作用,随着速度增加,碎冰浸没和翻转的现象更加明显,两者产生的作用力也迅速增加,所以会呈现非线性上升的趋势。

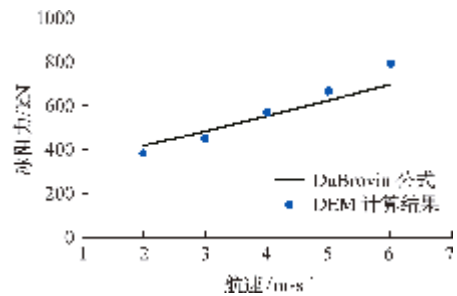


图 6 离散元模型与经验公式对比结果

Fig. 6 Comparison of DEM results with empirical formula

## 4 碎冰尺寸对船体冰阻力的影响

在碎冰区中,碎冰参数对船舶冰阻力影响显著。为研究冰块尺寸对冰阻力的影响规律,本文分别在不同冰厚和航速下对船舶在碎冰区的直航过程进行离散元数值模拟。

碎冰尺寸采用与碎冰等面积圆的直径  $\tilde{D}$  进行描述,即  $\tilde{D} = \sqrt{4A/\pi}$ , 其中  $A$  为碎冰块面积。WMO 将碎冰大小分为几类,即小碎冰尺寸为 20 m~100 m,中等碎冰尺寸为 100 m~500 m,大碎冰尺寸为 500 m~2 km。当碎冰尺寸足够大时,产生的冰阻力会逐渐接近相同冰况下平整冰阻力,此时碎冰尺寸称为碎冰向平整冰转化的临界尺寸。本文取海冰尺寸为 20 m~600 m,密集度为 50%。在同一碎冰区内的碎冰块尺寸相同,但位置随机分布。图 7 为冰厚为 1.0 m,航速为 2.0 m/s 时船舶在不同尺寸碎冰区内航行的离散元计算场景。

### 4.1 海冰厚度对冰块临界尺寸的影响

为研究不同冰厚下碎冰尺寸对船舶冰阻力的影响规律,在 50%海冰密集度和 2.0 m/s 航速下,分别取冰厚为 0.8 m,1.0 m,1.2 m 和 1.5 m,对船舶在不同尺寸碎冰区内的冰阻力进行离散元计算。在不同尺寸的船舶中,船长变化较大,为了研究船舶尺寸对碎冰尺寸的影响,本文将碎冰尺寸进行船

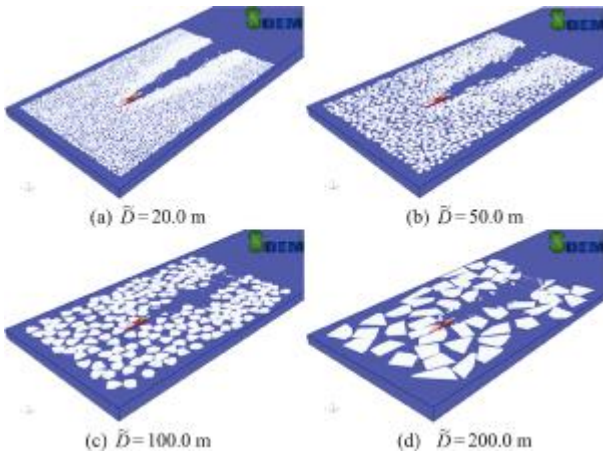


图7 不同冰块尺寸碎冰区船舶航行的离散元模拟  
Fig.7 Navigation of ship in broken ice field with various ice floe sizes simulated with DEM

长无量纲化,从而使其变化规律对不同船长的船舶均适用,即相对碎冰尺寸记为  $\tilde{D}_r = \tilde{D}/L_{ship}$ , 其中  $L_{ship}$  为船长。由此计算得到不同冰块尺寸下船舶冰阻力的峰值均值,如图8所示。可以看出,冰块尺寸对冰阻力的影响较大,并随着尺寸的增加而逐渐接近平整冰的冰阻力。将拟合的碎冰区冰阻力曲线与平整冰区 Lindqvist 冰阻力计算结果进行对比,可得到碎冰向层冰转化的临界相对尺寸  $\tilde{D}_{r-c}$ , 即冰块尺寸足够大,碎冰区与平整冰的冰阻力相近,由此可将碎冰区视为平整冰。

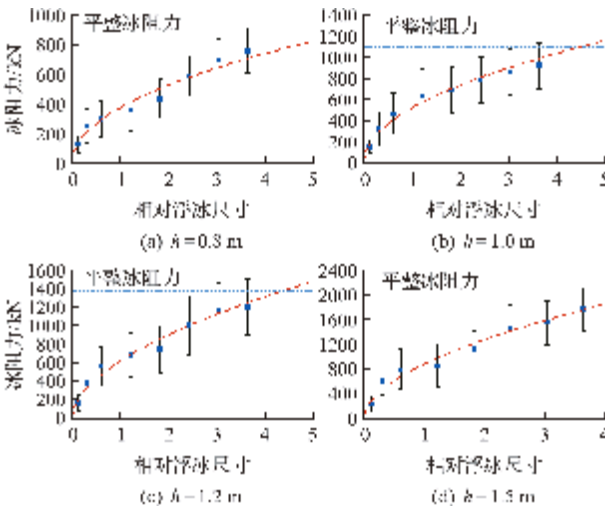


图8 不同冰厚下碎冰相对临界尺寸对船舶冰阻力的影响  
Fig.8 Influence of the relative critical size of broken ice on the ice resistance of ship under different ice thicknesses

不同冰厚下冰块临界尺寸  $\tilde{D}_{r-c}$  如图9所示。当冰厚为 0.8 m, 1.0 m, 1.2 m 和 1.5 m 时,冰块临界尺寸可以认作为平整冰的最小浮冰大小,分别为船长的 5.1 倍、4.4 倍、4.2 倍和 3.8 倍。可以看出,船舶冰阻力随冰厚的增加而增大,而冰块的临界尺寸随冰厚的增加而减小。冰层越厚,冰块的质

量越大,与船舶作用时,越不容易将滑动转化为动量,所以会和平整冰时的作用力越接近。

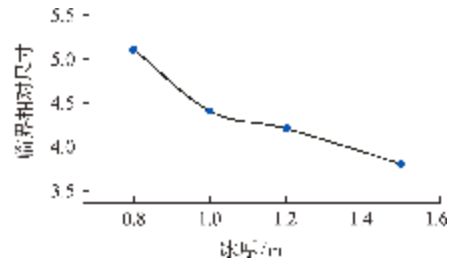


图9 不同冰厚下的冰块相对临界尺寸  
Fig.9 Relative critical size of ice floe under various ice thicknesses

#### 4.2 航速对冰块临界尺寸的影响

为分析船舶航速对冰块临界尺寸的影响,本文取海冰密集度 50%、冰厚 1.2 m 的碎冰区,分别在航速为 2.0 m/s, 4.0 m/s, 6.0 m/s 和 8.0 m/s 时对船体冰阻力进行离散元计算,由此得到冰阻力峰值的均值如图10所示。图11给出了不同航速下碎冰向平整冰转化的相对临界尺寸。可以看出,冰块相对临界尺寸  $\tilde{D}_{r-c}$  随着航速的增加而不断变大。这是因为航速越大,对海冰的作用力越大,冰块更加容易滑动,会降低对船舶的作用力,所以会不容易接近平整冰时的冰阻力。

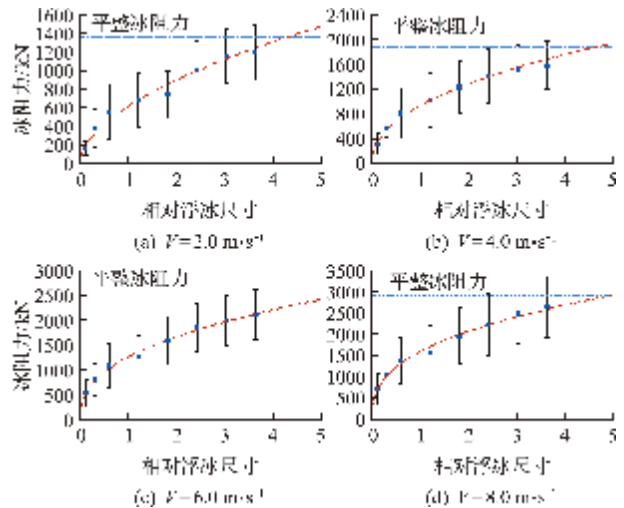


图10 不同航速下碎冰相对临界尺寸对船舶冰阻力的影响  
Fig.10 Relative critical size of ice for ice resistance of ship hull under different navigation velocities in broken ice field

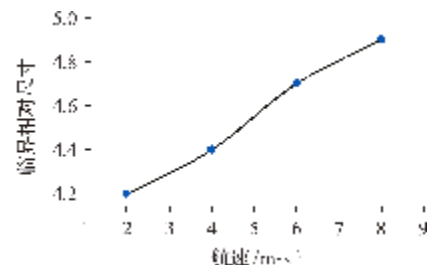


图11 不同航速下的碎冰相对临界尺寸  
Fig.11 Relative critical length of ice floe under various navigation velocities

## 5 结 论

为分析碎冰区船舶冰阻力随冰块尺寸的变化规律,本文采用离散元方法对海冰与船舶结构的相互作用进行数值计算。通过随机生成算法构造了具有随机分布特性的非规则冰块初始碎冰场,由此确定了不同冰厚和航速下碎冰尺寸对冰阻力的影响规律。研究表明,船舶冰阻力随冰厚的增加而不断增大,随航速的增加而不断升高。在此基础上引入无量纲冰块尺寸  $\tilde{D}_r = \tilde{D}/L_{\text{ship}}$ , 并确定了不同冰厚和航速下冰块的相对临界尺寸  $\tilde{D}_{r-c}$ 。当碎冰尺寸大于临界尺寸时,其对船舶的冰阻力与平整冰接近。在后续研究中,还将进一步研究海冰密集度和海冰强度等因素对浮冰临界尺寸的影响,从而为冰区安全航行提供参考依据。

## 参考文献(References):

- [1] 张 晓,谢瑱琛,张 瑜,等. 北极冰间湖时空变化过程及其形成机制研究进展[J]. 极地研究, 2022, **34**(3): 380-396. (ZHANG Xiao, XIE Tian-li, ZHANG Yu, et al. Processes underlying the formation and temporal and spatial variability of Arctic polynyas: A review[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2022, **34**(3): 380-396. (in Chinese))
- [2] Lu W J, Lubbad R, Løset S. Out-of-plane failure of an ice floe: Radial-crack-initiation-controlled fracture[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, **119**: 183-203.
- [3] Kjerstad Φ K, Metrikin I, Løset S, et al. Experimental and phenomenological investigation of dynamic positioning in managed ice [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, **111**: 67-79.
- [4] 黄焱,李 伟,王迎晖,等. 大型运输船极地浮冰区航行阻力的模型试验[J]. 中国造船, 2016, **57**(3): 26-35. (HUANG Yan, LI Wei, WANG Ying-hui, et al. Model tests on the resistance of a large transport ship in arctic region with pack ice [J]. *Shipbuilding of China*, 2016, **57**(3): 26-35. (in Chinese))
- [5] Jeong S Y, Choi K, Kim H S. Investigation of ship resistance characteristics under pack ice conditions[J]. *Ocean Engineering*, 2021, **219**: 108264.
- [6] Huang L F, Li Z Y, Ryan C, et al. Ship resistance when operating in floating ice floes: Derivation, validation, and application of an empirical equation [J]. *Marine Structures*, 2021, **79**: 103057.
- [7] Guo C Y, Zhang Z T, Tian T P, et al. Numerical simulation on the resistance performance of ice-going container ship under brash ice conditions [J]. *China Ocean Engineering*, 2018, **32**(5): 546-556.
- [8] 李紫麟,刘 煜,孙珊珊,等. 船舶在碎冰区航行的离散元模型及冰载荷分析 [J]. 力学学报, 2013, **45**(6): 868-877. (LI Zi-lin, LIU Yu, SUN Shan-shan, et al. Analysis of ship maneuvering performances and ice loads on ship hull with discrete element model in broken-ice fields[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2013, **45**(6): 868-877. (in Chinese))
- [9] 王 祥,胡 冰,刘 璐,等. 冰区航行船舶冰阻力及六自由度运动响应的离散元分析 [J]. 工程力学, 2023, **40**(4): 243-256. (WANG Xiang, HU Bing, LIU Lu, et al. Discrete element analysis of ice resistances and six-degrees-of-freedom motion response of ships in ice-covered regions [J]. *Engineering Mechanics*, 2023, **40**(4): 243-256. (in Chinese))
- [10] Liu L Y, Ji S Y. Ice load on floating structure simulated with dilated polyhedral discrete element method in broken ice field [J]. *Applied Ocean Research*, 2018, **75**: 53-65.
- [11] Yang B Y, Sun Z, Zhang G Y, et al. Numerical estimation of ship resistance in broken ice and investigation on the effect of floe geometry [J]. *Marine Structures*, 2021, **75**: 102867.
- [12] Huang L, Li M, Igreg B, et al. Simulation of a ship advancing in floating ice floes [A]. Proceedings of the 25<sup>th</sup> International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions [C]. 2019.
- [13] Paget M J, Worby A P, Michael K J. Determining the floe-size distribution of East Antarctic sea ice from digital aerial photographs [J]. *Annals of Glaciology*, 2001, **33**: 94-100.
- [14] 朱红日,季顺迎,刘 璐. 基于 Voronoi 切割算法的碎冰区构造及离散元分析 [J]. 计算力学学报, 2019, **36**(4): 454-463. (ZHU Hong-ri, JI Shun-ying, LIU Lu. Construction of broken ice field with Voronoi tessellation algorithm and its DEM simulations [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2019, **36**(4): 454-463. (in Chinese))
- [15] Metrikin I. A Software framework for simulating stationkeeping of a vessel in discontinuous ice [J]. *Modeling, Identification and Control*, 2014, **35**(4): 211-248.
- [16] 雷建奇,狄少丞,于加一,等. 船-冰作用中海冰典型破坏模式的离散元数值模拟 [J]. 计算力学学报, 2021, **38**(3): 346-354. (LEI Jian-qi, DI Shao-cheng, YU Jia-yi, et al. Discrete element numerical simulation of typical failure modes of sea ice under ship-ice interaction

- [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2021, **38**(3):346-354. (in Chinese))
- [17] 于 杰, 罗 泉, 赵婷婷, 等. 不同重力场下颗粒冲击过程的离散元分析[J]. *计算力学学报*, 2023, **40**(5): 801-806. (YU Jie, LUO Xiao, ZHAO Ting-ting, et al. Numerical analysis of particle impact under different gravity conditions by discrete element method [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2023, **40**(5):801-806. (in Chinese))
- [18] 狄少丞, 季顺迎, 薛彦卓. 船舶在平整冰区行进过程的离散元分析[J]. *海洋工程*, 2017, **35**(3): 59-69. (DI Shao-cheng, JI Shun-ying, XUE Yan-zhuo. Analysis of ship navigation in level ice-covered regions with discrete element method [J]. *The Ocean Engineering*, 2017, **35**(3):59-69. (in Chinese))
- [19] DuBrovin O V. Calculation of Broken Ice Resistance based on Model Testing [R]. University of Michigan of Engineering, 1970.

## Influence of ice floe size on ice resistance of ship hull in broken ice field based on discrete element analysis

ZHANG Xin-ao<sup>1</sup>, YU Bin<sup>2</sup>, YANG Dong-bao<sup>1</sup>, LIU Lu<sup>3</sup>, JI Shun-ying<sup>\*1</sup>

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China;

3. School of Naval Architecture Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The ice resistance affects the safety and navigation performance of a ship when sailing in a broken ice field. In this paper, icebreaker *Xuelong* is taken as the research object. The three-dimensional discrete element method (DEM) is used to numerically simulate the ice resistance of ship structures in a broken ice field. Based on a random generation algorithm, the irregularly shaped area of broken ice is modeled to form a complex initial broken ice field. Considering the force of seawater on the hull structure, the calculation model of the broken ice resistance of the hull is established. And the DEM results are compared well with the DuBrovin equation for ice resistance in a broken ice field. Based on the DEM simulated results, and the influence of ice size on broken ice under different ice thickness and speed is studied. Based on the Lindqvist formula of hull ice resistance in a flat ice region, the critical scale of the transformation from broken ice to layered ice is obtained. The critical size of floe can be used as a criterion to identify the broken ice area and level ice. This work can provide a certain reference for the safe navigation of ships in the polar ice regions.

**Key words:** icebreaker; discrete element method; broken ice field; ice floe size; ice resistance