文章编号: 1000-4882 (2025) 02-0183-11

# 基于近场动力学方法的刚性球冲击冰板 断裂数值模拟研究

#### 李一范,谢丰泽,万德成\*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院,船海计算水动力学研究中心(CMHL),上海 200240)

#### 摘 要

冲击破冰涉及到结构与冰层之间的相互作用。基于键基近场动力学方法,建立了刚性球冲击矩形冰板的 数值模型,通过与试验数据比较,验证了模型精度,对比分析了不同冲击速度和冲击攻角条件下冰板裂纹的 发展和演化规律。结果表明,低速冲击下冰板不存在明显的周向裂纹,随着冲击速度的增大,冰板断裂显著 加剧,并伴随诸多分支裂纹。冲击攻角的存在使冰板裂纹的分布具有明显的不对称性。在冲击速度相同时, 采用较大攻角可取得更为理想的破冰效果。

 关键
 词:
 键基近场动力学;冲击破冰;断裂损伤过程;数值模拟

 中图分类号:
 P75
 文献标志码: A

0 引 言

在冰区工程中,采用刚性结构冲击破冰的方法具有重要应用价值。目前已有多种数值模拟方法应 用于冰与结构的相互作用,其中常用方法是有限元法(finite element method, FEM),用于评估冰盖的 断裂行为和载荷特征。Kim等<sup>[1-2]</sup>采用 FEM 模型对破冰货船在浮冰条件下的阻力性能进行了数值研究, 并与试验结果进行对比,验证了模型的准确性,分析得到不同水线角条件下的阻力性能。FEM 能够模 拟冰的破裂过程,但其关于连续性的假设不适用于冰裂缝处的非连续位移场,难以预测动态裂缝的扩 展路径以及揭示破坏机制。应用于冰断裂力学以及冰与结构相互作用的无网格方法得到重视,具有代 表性的是离散元法(discrete element method, DEM)。季顺迎等<sup>[3]</sup>建立了海冰与圆柱形直立桩相互作用 的 DEM 模型,计算得到了不同桩径条件下的平均冰力时历曲线,表明平均冰力与桩径成正比。Long 等<sup>[4]</sup>采用 DEM 研究了上下锥形结构对冰盖破碎和冰载荷特征的影响,表明冰盖在与上下锥形接头接触 时容易出现局部破碎,但对最大冰载荷几乎没有影响。DEM 在模拟断裂过程的不连续阶段具有优势, 但连续阶段的精度较差,以至于在模拟从连续到不连续的整个断裂过程时可能出现错误<sup>[5]</sup>。

近场动力学(peridynamics, PD)是一种非局部连续体固体力学方法,由 Silling<sup>[6]</sup>首次提出。PD 具有无网格方法的特性,其运动方程用积分形式表示,不同于传统方法中常用的偏微分方程,因此在 求解非连续性问题时仍然适用。PD 可"自发"模拟裂纹的产生和扩展,无需预设裂纹<sup>[7]</sup>,可较准确地 捕捉冰层在冲击载荷作用下的动态断裂过程和破碎特征,特别适用于处理裂纹尖端及其扩展这一类问

收稿日期: 2024-6-24; 修改稿收稿日期: 2024-12-10

基金项目:国家自然科学基金项目(52131102)

题。Wang 等<sup>[8]</sup>采用键基近场动力学方法研究了水下爆炸载荷作用下的冰盖破碎过程,通过建立高应变 率条件下的弹脆性本构模型,模拟了冰盖裂纹的形成和扩展过程,发现圆形裂纹明显早于径向裂纹出 现,破冰半径影响因素的数值结果与试验结果高度吻合。Ye 等<sup>[9]</sup>采用 PD 和接触探测相结合的数值模 型,模拟了潜艇在冰面上的动力行为。通过柱状冰三点弯曲和圆柱体冰盖垂直穿透两种情况的模拟, 验证了 PD 模型在低应变率条件下模拟冰破坏的可行性,还模拟了潜艇破冰上浮过程。结果表明,冰 的冲切破坏主要发生在锥塔表面的覆冰上,而冰的挤压破坏主要发生在尾鳍表面的覆冰上。熊伟鹏等<sup>[10]</sup> 采用 PD 方法数值模拟了冰球的高速冲击破坏过程,分析了不同速度下的冲击载荷规律。结果表明随 冲击速度的增大,冲击载荷及其震荡现象均明显加剧。冰球在高速冲击下的破坏特征呈粉碎状,随着 冲击速度的减小,碎冰尺度有所增大。徐佩等<sup>[11]</sup>建立了冰与结构相互作用的 PD 数值模型,用于模拟 冰-吊舱推进器的切削过程,分析了直航、斜航以及操舵状态下,吊舱推进器在切削时受到的冰载荷以 及整体扭矩的特性。当前对于冰与结构物相互作用的研究主要着眼于冲击过程中结构和冰的动力学响 应,而针对破碎过程中冰裂纹形成和扩展规律的研究较少<sup>[12]</sup>。

本文基于键基近场动力学方法,针对矩形冰板在刚性球冲击作用下的断裂过程进行数值模拟。通 过对试验数据和数值模拟结果的比较,验证了模型的准确性,还分析了不同冲击速度和冲击攻角条件 下冰板的破碎特征。

1 键基近场动力学理论

#### 1.1 运动方程及本构关系

近场动力学的核心思想是将研究对象等效离散为一系列具有质量和体积的物质点,这些物质点之间 的相互作用不仅局限于直接相邻的点,而且考虑到一定范围内的其他物质点。这种非局部的相互作用是 通过引入一个近场域尺寸δ来定义的,称为"Horizon"。由牛顿第二定律,近场动力学的平衡方程为<sup>[6]</sup>

$$\rho \ddot{\boldsymbol{u}}(\boldsymbol{x},t) = \int_{H_x} \boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}',t) - \boldsymbol{u}(\boldsymbol{x},t), \boldsymbol{x}' - \boldsymbol{x}) \mathrm{d} V_{x'} + \boldsymbol{b}(\boldsymbol{x},t)$$
(1)

式中, $\rho$ 为物质密度;**u**为物质点的位移;**ii**为加速度;t为时间;H<sub>x</sub>为物质点的近场域范围内其他物质点的集合,即H<sub>x</sub> = { $x' \in R : ||x'-x|| < \delta$ }; $\delta$ 为近场域的半径;**f**为物质点x'和x的相互作用力密度;V<sub>x</sub>为物质点x'的体积;**b**为体积力密度。

在近场域内,定义 $\xi = x' - x$ 为一对物质点的初始相对位置, $\eta = u(x',t) - u(x,t)$ 为这对物质点在 *t*时刻的相对位移。本文采用 Silling 等<sup>[5]</sup>提出的微观弹脆性(PMB)模型描述冰板的本构关系,初始 状态下呈各向同性,其物质点对的键基力密度函数表达式为

$$f(\boldsymbol{\eta},\boldsymbol{\xi}) = \frac{\partial \omega(\boldsymbol{\eta},\boldsymbol{\xi})}{\partial \boldsymbol{\eta}} = cs \frac{\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\xi}}{|\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\xi}|} \mu(t,\boldsymbol{\eta},\boldsymbol{\xi})$$
(2)

式中, $\omega(\eta, \xi)$ 为键的微观弹性应变能密度,是一个标量函数;c为材料的微观弹性模量,表示键的弹性刚度;s为任意t时刻物质点之间的键伸长率; $\mu(t, \eta, \xi)$ 为断键准则函数,将在 1.2 节中介绍。 $\omega(\eta, \xi)$ 和s的表达式为

$$\omega(\boldsymbol{\eta},\boldsymbol{\xi}) = \frac{cs^2}{2} |\boldsymbol{\xi}| \tag{3}$$

$$s = \frac{|\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\xi}| - |\boldsymbol{\xi}|}{|\boldsymbol{\xi}|} \tag{4}$$

对于近场域内任意一给定的物质点所包含体积的能量密度应与基于经典 Cauchy 弹性理论中相同 材料和变形的应变能密度<sup>[5]</sup>相等,由此给出冰板的弹性刚度:

184

$$c = \frac{18k}{\pi\delta^4} = \frac{6E}{\pi\delta^4(1-2\nu)} \tag{5}$$

式中, *k* 为体积模量; *E* 为弹性模量, *k* = *E* / 3(1-2*v*); *v*为泊松比, 三维问题中取为 0.25。采用 PD 模 拟冲击损伤时, 泊松比对裂纹扩展速度以及路径的影响很小<sup>[13]</sup>, 因此本文不讨论泊松效应。

#### 1.2 冰板损伤模拟

为描述冲击作用下的冰层断裂现象,需要引入与时间相关的断键准则函数  $\mu(t, \eta, \xi)^{[5]}$ :

$$\mu(t, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\xi}) = \begin{cases} 1 & \text{if } s < s_0 \quad \text{for all} \quad 0 \leq t' \leq t, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$
(6)

式中, s<sub>0</sub>为临界伸长率,表示当连接任意两个物质点之间的键被拉伸到超过某一临界值时,键即发生断裂失效,物质点间不再有键基力,这种失效不随时间推移改变。

对于本文所考虑的冰板, so的计算公式如下[5]:

$$s_0 = \sqrt{\frac{10G_0}{\pi c \delta^5}} = \sqrt{\frac{5G_0}{9k\delta}} \tag{7}$$

式中, G<sub>0</sub>为材料的临界能量释放速率,也称断裂能。

尽管本文中的冰板在初始状态下是各向同性的,某个特定方向上的键断裂将会导致随后的响应具 有各向异性。引入如下的损伤指数来描述物质点的损伤程度<sup>[5]</sup>:

$$\varphi(\mathbf{x},t) = 1 - \frac{\int_{H_x} \mu(\mathbf{x},t,\boldsymbol{\eta},\boldsymbol{\xi}) \mathrm{d}V_{\boldsymbol{\xi}}}{\int_{H_x} \mathrm{d}V_{\boldsymbol{\xi}}}$$
(8)

式中, $\varphi \in [0,1]$ 。当 $\varphi = 1$ 时,物质点之间的键全部断裂失效;当 $\varphi = 0$ 时,材料为初始状态,即物质点间的键没有破坏。

不难看出,损伤指数表示在一定时间范围内物质点的损伤程度,即为物质点的近场动力学范围内 发生断裂失效的键与所有的键之比。

### 2 计算模型与验证

#### 2.1 刚性球冲击冰板数值模型建立与验证

本文基于 Zhang 等<sup>[14]</sup>的刚性球和冰板试验中的参数设置来建立数值模型。刚性球直径为 15 mm, 质量为 13.99 g。矩形冰板长度为 0.22 m,宽度为 0.22 m,厚度为 0.01 m。刚性球冲击速度为 71.7 m/s。 冰板的材料参数如表 1 所示。验证工况中,粒子间距为 dx = 1 mm,取近场域半径 $\delta$  = 4dx,时间步长 设为 1.0 × 10<sup>-6</sup> s。

表 1 冰板的材料参数			
杨氏模量 E / GPa	密度 p / (kg/m <sup>3</sup> )	临界伸长率 50	泊松比v
3.8	907	0.001	0.25

图 1 给出了上述工况近场动力学模拟得到的冰板损伤过程与相关试验的对比,包括冰板上表面和 下表面的裂纹特征。以刚性球与冰板接触的瞬间作为 0 时刻,由冰板上表面数值结果可知,冰板首先 产生周向裂纹。在 50 µs 时,冰板产生明显的径向裂纹,而且不断向四周延展。在 200 µs 时,径向裂 纹己扩展至冰板边缘,同时冰板产生大量不规则的分支裂纹,这与试验结果基本一致。在 450 µs 时, 刚性球几乎整体穿透冰板,进一步加剧分支裂纹的形成。冰板遭受刚性球冲击后,在下方形成明显的



破碎特征,破碎区域的形状由弧面型凸起转变为端部凸起的圆柱体,这也呈现与试验结果相同的特征。

图 1 冰板断裂过程数值模拟与试验结果对比

#### 2.2 冰板断裂过程和裂纹特征分析

图 2 分别给出了横截面视角和单独断裂面冰板损伤过程的 PD 数值模拟结果,以便于更好地观察 冰板损伤过程中的裂纹特征和破碎脱落过程。刚性球与冰板接触初期,即 0 时刻,冰板表面出现小的 锥形损伤;在 50 µs 时,冲击区域演变为两个短圆锥形撞击坑,同时,从锥形撞击坑边界开始萌生更 多穿透厚度方向的径向裂缝;在 100 µs 时,中心径向裂纹出现对称分布的分支裂纹,并最终交汇形成 闭合裂纹;在 450 µs 时,撞击坑的范围进一步扩大,冰板破碎后的部分呈圆柱形向下脱落。图 3 展示 了刚性球穿过冰板造成损伤后的横截面特征,将 PD 模拟结果和通过试验<sup>[14]</sup>得到的损伤机理图进行对 比,不难看出由横截面观察到的损伤情况趋于一致,都呈现两个短圆锥形撞击坑的特征,这也进一步 印证了数值模型的准确性。



3 计算结果分析

### 3.1 不同冲击速度下冰板损伤情况对比分析

为了探究冲击速度对裂纹特征的影响,在验证工况的基础上改变冲击速度,分别设置了 10,20,30 和 50 m/s 这 4 组对比工况进行对比分析。

图 4 展示了不同冲击速度下冰板裂纹特征的对比,包括冰板的俯视角和单独的裂纹断裂面。图 4(a) 工况中对应的时刻分别为 0,100,500 和 1 000 µs,其余 3 个工况对应的时刻分别为 0,50,100 和 250 µs。 随冲击速度的增大,冰板所受损伤逐渐加剧。在图 4(a) 工况中,刚性球的冲击速度为 10 m/s,冰板在 整个断裂过程中没有产生明显的周向裂纹,而其他工况显示,随着冲击速度的增大均产生了更加明显 的周向裂纹。值得注意的是,对于冲击速度较大的工况,径向裂纹产生的时刻更加提前。观察裂纹的 产生及扩展特征可见,图 4(a) 工况中首先沿对角线方向产生 4 条径向裂纹,后发展为 8 条径向裂纹, 与其他工况相比,不存在细小的分支裂纹。图 4(b) 和图 4(c) 工况中形成了最为显著的 4 条径向裂纹, 它们与冰板边界平行,且存在少许分支裂纹,而图 4(d) 工况中除了产生诸多径向裂纹,还伴随有大量 分支裂纹,最终与径向裂纹交汇造成冰板区域性破坏。



中国知网 https://www.cnki.net



图4(续) 不同冲击速度下的冰板损伤情况对比

#### 3.2 不同冲击攻角对冰板损伤情况的影响

考虑到实际情况中的高速弹丸不局限于垂向冲击破冰,刚性球与冰板之间可能存在一定的冲击攻角,因此分别设置了 30°,45°,60°和 75°这 4 个冲击攻角进行对比分析,冲击速度与图 4(d) 所示一致。

图 5 展示了不同冲击攻角下冰板裂纹特征的对比情况,选取的典型时刻依次为 0,50,100 和 250 μs。 不难看出,与垂直冲击情形相比,以一定攻角冲击后的冰板损伤情况存在明显的不对称性,随着攻角逐 渐增大,这种不对称性呈减小的趋势。由于存在水平方向的分速度,一侧的冰层受刚性球挤压,在撞击 坑附近形成单侧的破坏区域,该区域内不仅有完全断裂的径向裂纹,还存在断裂程度较小的粘连区域。 在这些粘连区域近场域内,键的断裂数量明显小于冰板受垂直冲击时相同位置的断裂数量,相应的破坏 程度显著降低。在较小攻角冲击作用下,与刚性球运动方向相反的一侧冰层仅含有 2 条沿对角线方向的 径向裂纹;随着攻角的增大,径向裂纹数量开始增加,并伴随有一些分支裂纹出现,两侧的冰层损伤程 度逐渐趋向平衡。依照损伤程度直观来看,在相同冲击速度下,较大攻角下的破冰情况更加理想。



(d)冲击攻角为 75° 图 5 不同冲击攻角下的冰板损伤对比

图 6 展示了不同冲击攻角下刚性球冲击冰板过程中的受载情况,分别给出了 *F<sub>x</sub>*(平行于冰板方向的载荷)和 *F<sub>y</sub>*(垂直于冰板方向的载荷)的时历曲线。不难看出,除 75°攻角工况外,其他 3 个工况中平行于冰板方向的载荷峰值差距较小。4 个工况中载荷峰值的对应时刻随攻角增大呈现滞后现象,达到峰值后衰减到趋近于 0,且载荷为 0 对应时刻随攻角增大有所提前。垂直于冰板方向的载荷峰值



随攻角增大而增大,且达到峰值后均在较短时间内衰减至0,此时刚性球基本已穿过冰板下表面。

# 4 结 论

本文基于键基近场动力学方法,建立了刚性球冲击矩形冰板的数值模型,对冰板在冲击作用下的 断裂损伤过程进行模拟,讨论了不同冲击速度下冰板裂纹的发展规律和冲击攻角对冰板裂纹演化和受 力的影响,得到以下结论:

(1)建立的键基近场动力学模型可较好地模拟受刚性球冲击的冰板损伤过程及裂纹演化,与试验结果保持良好的一致性,尤其冲击后期的裂纹特征和断裂横截面吻合度较高。

(2)随着冲击速度增大,冰板损伤程度显著加剧。低速冲击下的冰板首先产生沿对角线方向的 4条径向裂纹,后发展为8条径向裂纹;随着冲击速度增大,冰板首先产生明显的周向裂纹;较高的 冲击速度会导致冰板形成与冰板边界平行的4条裂纹,且伴随有细小的分支裂纹;在更高冲击速度 下会向四周产生诸多径向裂纹,且分支裂纹相互交汇,冰板损伤程度明显增加。

(3)由于攻角的存在,受冲击冰板的裂纹分布存在明显的不对称性。水平方向的分速度导致其中 一侧的冰层受到刚性球挤压,在撞击坑附近形成具有粘连区域的单侧破坏特征,这些粘连区域的物质 点近场域内的键并未完全断裂,破坏程度较低。垂直于冰板方向的载荷受攻角影响的程度更大,其载 荷峰值随攻角增大而显著增大。在相同冲击速度下,较大的攻角可取得较为理想的破冰效果。

#### 参 考 文 献

- KIM M C, LEE S K, LEE W J, et al. Numerical and experimental investigation of the resistance performance of an icebreaking cargo vessel in pack ice conditions[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2013, 5(1): 116-131.
- [2] KIM M C, LEE W J, SHIN Y J. Comparative study on the resistance performance of an icebreaking cargo vessel according to the variation of waterline angles in pack ice conditions[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2014, 6(4): 876-893.
- [3] 季顺迎, 狄少丞, 李正, 等. 海冰与直立结构相互作用的离散单元数值模拟[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 463-469.
- [4] LONG X, LIU S, JI S. Breaking characteristics of ice cover and dynamic ice load on upward-downward conical structure based on DEM simulations[J]. Computational Particle Mechanics, 2021, 8: 297-313.
- [5] SILLING S A, ASKARI E. A meshfree method based on the peridynamic model of solid mechanics[J]. Computers &

Structures, 2005, 83(17): 1526-1535.

- [6] SILLING S A. Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2000, 48(1): 175-209.
- [7] 薛彦卓, 刘仁伟, 王庆, 等. 近场动力学在冰区船舶与海洋结构物中的应用进展与展望[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(5): 1-15+63.
- [8] WANG Q, WANG Y, ZAN Y, et al. Peridynamics simulation of the fragmentation of ice cover by blast loads of an underwater explosion[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2018, 23(1): 52-66.
- [9] YE L Y, GUO C Y, WANG C, et al. Peridynamic solution for submarine surfacing through ice[J]. Ships and Offshore Structures, 2020, 15(5): 535-549.
- [10] 熊伟鹏, 王超, 傅江妍, 等. 冰球冲击试验的近场动力学方法数值模拟[J]. 振动与冲击, 2020, 39(7): 148-155.
- [11] 徐佩, 王超, 郭春雨, 等. 基于近场动力学数值方法的冰-吊舱推进器接触判断研究[J]. 力学学报, 2021, 53(5): 1383-1401.
- [12] ZHANG Y, WANG Q, OTERKUS S, et al. Numerical investigation of ice plate fractures upon rigid ball impact[J]. Ocean Engineering, 2023, 287: 115824.
- [13] SILLING S A, EPTON M, WECKNER O, et al. Peridynamic states and constitutive modeling[J]. Journal of Elasticity, 2007, 88(2): 151-184.
- [14] 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.

## Numerical Simulation of Ice Sheet Fracture upon Rigid Ball Impact Based on Peridynamic Method

LI Yifan, XIE Fengze, WAN Decheng\*

(Computational Marine Hydrodynamics Lab (CMHL), School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

#### Abstract

Impact during icebreaking involves the interaction between the structure and ice. To study the damage process of ice plate after impact, a numerical model of rigid ball impacting rectangular ice plate is established based on the bond-based peridynamic method. The accuracy of the model is verified by comparing numerical simulation results with experimental data. The development of ice plate cracks under different impact velocities and the influence of the impact angle on the evolution of ice plate cracks are investigated. The results show that there is no obvious circumferential crack in the ice plate under low velocity impact. As the impact velocity increases, the fracture damage of the ice plate increases, accompanied by many branch cracks. The angle of attack makes the distribution of ice plate cracks asymmetric. Under the same impact velocity, the effect of ice breaking with a larger angle of attack is more significant.

Key words: bond-based peridynamic; impact icebreaking; fracture damage process; numerical simulation

作者简介

李一范 男,2001年生,博士研究生。主要从事无网格粒子法研究。

谢丰泽 男,1999年生,博士,博士后。主要从事船海水动力学和无网格粒子法计算理论、求解器开发与应用等研究。

**万德成** 男,1967年生,教授,博士研究生导师。主要从事船舶与海洋工程水动力学、流体力学有限元方法、流-固耦 合和运动界面问题的数值模拟、拟小波高精度格式和强对流问题求解器设计、移动网格技术、分块并行计算方 法、计算流体力学软件集成与开发等研究。

\*通讯作者:万德成