

研究综述

海冰离散元模型的研究回顾及展望

季顺迎¹ 李春花² 刘煜²

(¹大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116023;

²国家海洋环境预报研究中心, 国家海洋局海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081)

摘要 为描述极区及副极区海冰在不同尺度下的离散分布特性, 以及海冰与海洋结构相互作用过程中的破碎性能, 海冰的离散单元模型从20世纪80年代发展起来并不断完善。将海冰离散单元模型分为地球物理尺度(~100 km)、浮冰块尺度(10—10 000 m)和海洋结构尺度(1—100 m)等3种不同尺度, 讨论不同尺度下海冰的离散分布规律或海冰由连续状态向离散状态转化的动力过程。通过对块体、圆盘和颗粒不同形态的海冰离散单元模型的介绍, 对其在极区海冰的动力特性、海冰重叠堆积及其与波浪的作用过程、海冰与海洋结构的相互作用中的应用进行分析, 对海冰强度的尺度效应进行讨论。最后, 讨论海冰离散单元模型中存在的问题和重点研究内容。

关键词 海冰 离散单元模型 尺度效应

doi:10.3724/SP.J.1084.2012.00315

0 前言

海冰在不同尺度下均呈现出很强的离散特性, 尤其表现为小尺度下的断裂、重叠和堆积现象, 以及大中尺度下的非连续流变行为。以往人们大多依据连续介质力学的方法进行不同尺度下海冰力学性质的研究。近20年来, 则更多地关注于海冰的离散分布特性, 采用离散单元法表述海冰在不同尺度下的非连续分布特性, 模拟其复杂的动力学行为。

20世纪80年代, 离散单元模型被应用到海冰动力学中, 通过单元间的碰撞过程研究了平均应力与应变率的对应关系^[1-2]。随后, 该模型进一步应用于碎冰区的动力特征模拟^[3-5]。目前, 离散单元模型不但用于小尺度下冰块间的碰撞模拟^[6-8], 还在中尺度下冰脊的形成、冰隙的产生以及冰缘区的海冰演

化过程中有所发展^[8-9]。当考虑海冰单元因冻结而产生的粘接作用时, 它又被进一步应用于极区大尺度下的海冰动力学中^[10-11]。此外, 海冰与海洋结构物的相互作用是海冰不断破碎与结构物持续振动的耦合过程。近年来, 基于离散元模型的海冰与结构物相互作用的研究取得了很大的进展^[12-13]。

采用离散单元模型进行海冰动力过程数值模拟的出发点是海冰在不同尺度下均表现出显著的离散分布特性。目前, 对海冰力学特性的研究大体分为如下3个尺度, 即地球物理尺度、浮冰块尺度和海洋结构尺度^[14-15]。如果进一步考虑海冰的室内模型试验尺度和细观材料尺度, 可将海冰力学行为研究范畴扩展为5个, 即极区及副极区海冰动力学过程的地球物理尺度(~100 km)、海冰重叠和堆积过程的浮冰块尺度(10—10 000 m)、海冰与海洋结构物相互作用的结构尺度(1—100 m)、海冰力学性质试

[收稿日期] 2012年4月收到来稿, 2012年4月收到修改稿

[基金项目] 国家海洋公益性行业科研专项经费项目(2012418007, 201105016)、国家自然科学基金项目(41176012)、中央高校基本科研业务费专项(DUT12YQ02)和国家海洋局极地考察办公室对外合作支持项目(IC201211)资助

[作者简介] 季顺迎, 男, 1972年生。博士, 教授, 研究方向为工程海冰数值模型。E-mail: jisy@dlut.edu.cn

[联系作者] 刘煜, 男, 1973年生。副研究员, 研究方向为海冰数值模式及业务化预报。E-mail: liuyu@nmefc.gov.cn

验的模型试验尺度(10^{-1} — 10 m)和冰晶结构特征的细观材料尺度(10^{-3} — 10^{-1} m)。以上划分在一定程度上考虑了海冰研究问题的性质,当然不同尺度间并没有完全的界限。目前海冰离散单元模型已成功应用于地球物理尺度、浮冰块尺度和海洋结构尺度下的海冰问题研究,而对于模型试验尺度和细观材料尺度还尚未建立有效的离散单元模型。此外,海冰在不同尺度下表现出很强的离散分布特性的同时,其强度还呈现出明显的尺度效应^[16-17]。为此,本文通过对不同尺度下海冰的离散分布特性及离散元模型进行介绍,分析海冰强度的尺度效应,最后对海冰离散单元模型的发展前景进行讨论。

1 地球物理尺度下海冰的离散元模型

针对大中尺度下海冰的离散特性,可采用块体离散元模型对其动力演化过程进行数值分析;另外,将海冰视为颗粒介质,建立了一系列的本构模型以描述海冰的宏观力学行为,并可通过改进的离散单元模型对其动力过程进行数值模拟。

1.1 地球物理尺度下海冰的离散分布特性

极区大面积浮冰是由冰脊、重叠冰、平整冰、莲叶冰和开阔水混合组成的。卫星遥感图像分析表明海冰的变形主要在大块浮冰的交界处发生,形变尺度从 ~ 1 m到 $\sim 1\ 000$ m以上,具有很大的尺度差异^[18-19]。此外,在卫星遥感、现场观测和室内试验中,海冰都存在相似的断裂规律,且碎裂尺寸的比例是不变的^[20-21]。

极区海冰的分布具有很强的离散性,如图1(a)中卫星遥感图像所示^[20]。图1(b)为对其冰块尺度进行统计分析的结果。图中采用了三个不同的统计阈值,当冰块面积所占像素点分别低于该阈值时忽略不计。结果表明,积累分布随尺度的增加呈指数减小,即 $N_L \propto L^{-b}$,这里 N_L 为尺度小于 L 的冰块个数; b 与阈值有关,并在1.3—1.54之间。对北极Kara海1994年2月24日的SAR卫星遥感图像分析也得到了相似的关系,即 $N_A \propto A^{-b}$,且 $b = 1.6 \pm 0.2$ 。这里 A 为冰块面积,一般小于 10^3 km², N_A 为面积小于 A 的冰块个数^[22]。渤海海冰卫星遥感图像同样显示出渤海海冰有很强的离散分布特性,如图2所示。

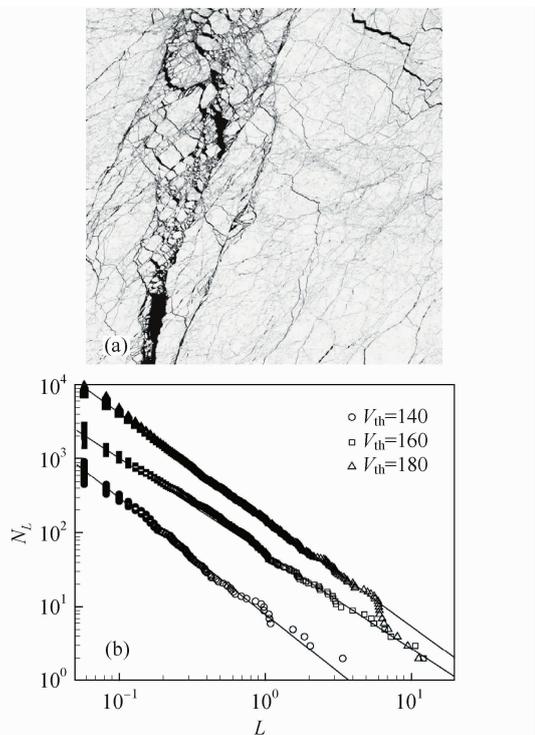


图1 1996年4月6日北极海冰分布。(a) SPOT卫星图像;(b)识别的冰块尺度分布。图像面积为 $59\text{ km} \times 59\text{ km}$,中心位置为 $(89^{\circ}11'N, 108^{\circ}33'W)$

Fig. 1. Sea ice distribution in the Arctic on April 6, 1994. (a) Satellite image of SPOT; (b) Identified ice floe size distribution

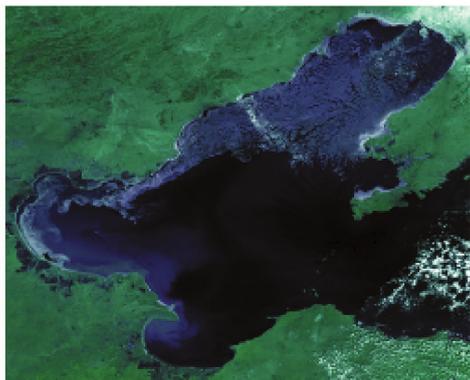


图2 2001年2月16日渤海海冰的MODIS卫星遥感图像
Fig. 2. Sea ice image remoted with MODIS satellite in the Bohai Sea on February 16, 2001

1.2 地球物理尺度下海冰的离散单元模型

海冰块体离散元方法最初用于处理波浪和海冰的相互作用,随后用于海冰重叠和堆积过程研究,最近又进一步应用于大、中尺度下的海冰动力学数值模拟。

1.2.1 海冰的块体离散元模型

针对海冰破碎下的形态可建立相应的块体离散单元模型。在计算冰块间的相互作用时,采用粘性、弹性和塑性模型来描述挤压破坏、摩擦、屈曲和弯曲破坏等力学过程,并忽略拉伸强度^[6,23-24]。该作用力模型主要分为两个部分:一是模拟冻结冰块间的断裂作用,二是模拟非冻结单元间的摩擦作用。在冻结单元的弹性变形模型中,两个冻结在一起的相邻冰体被视为通过粘弹性模型粘接在一起,并可承受一定的拉力和压力。冰块为刚性体,其弹性变形以粘结位置相对运动的形式体现。冰块间以沿着粘结位置 ξ 的相对位移矢量 δ 来描述其应力状态,其中矢量 δ 可分解为法向分量 δ_n 和切向分量 δ_t ,如图3所示。图中 k_1 和 k_2 分别为加载和卸载曲线的斜率, σ_c 和 σ_t 分别为压缩和拉伸应力; δ_c 和 δ_{cf} 分别为压缩位移和发生压缩断裂(成脊)时的位移, δ_i 和 δ_{if} 分别为拉伸和发生拉伸断裂时的位移, ξ 为冰块间的接触位置^[25-26]。

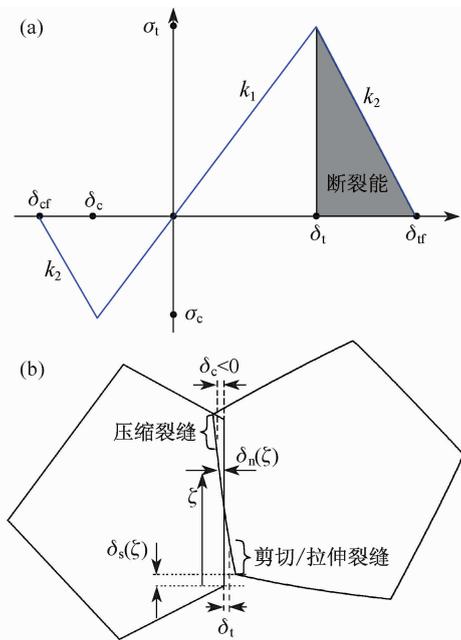


图3 海冰块体离散单元中的作用力模型^[6,25-26]

Fig. 3. Interaction force model of sea ice block discrete element model^[6,25-26]

进一步考虑海冰的重叠和堆积过程,冰块间的法向和切向作用力模型如图4所示,其中锯齿模块表征冰脊过程中不可恢复的塑性变形, k_{ne} 和 k_{te} 分别为法向和切向弹性刚度, η 为阻尼系数, μ 为摩擦系数, k_{np} 为海冰塑性强化刚度。

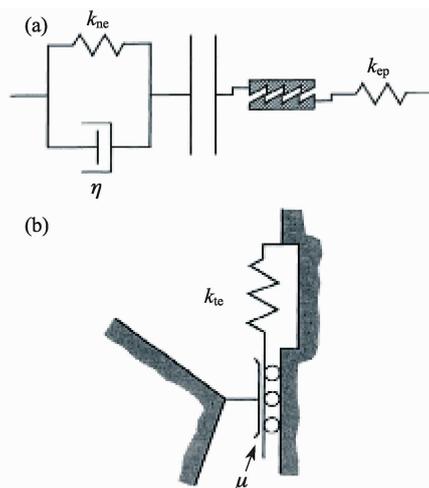


图4 冰块间法向和切向作用力的接触模型^[6]

Fig. 4. Contact force models in normal and tangential directions between sea ice floes^[6]

1.2.2 极区海冰动力过程的离散元模拟

采用海冰块体离散单元模型,将1998年1月20日的北极海冰离散为42 000个单元,其大小依据卫星监测资料确定,平均尺度为13 km(如图5(a)

所示)^[27-28]。海冰的压缩强度设为 $\sigma_c = \sqrt{\frac{E\rho_w g h^3_{min}}{12}}$,

时间步长 $dt = \pi/L\sqrt{\frac{\rho_i}{E}}$ 。如果海冰单元平均长度 $L = 7$ km,弹性模量 $E = 1.0$ GPa,则有 $dt = 3.6$ s。计算结果表明,海冰在风场、流场和边界约束下,经24 h动力作用后,海冰不断发生断裂,形成明显的水道和开阔水域。对海冰动力演化过程中冰块尺寸进行统计分析,可获得不同时刻海冰破碎特性的演化规律。对摩擦系数、最小冰厚、单元平均长度、弹性模量等因素影响下的海冰断裂特性进行了数值分析,结果表明单元划分尺度对海冰的断裂特性影响不大,但在高精度计算模式下,海冰变形的局部化现象更加明显。对1998年1月22—25日间海冰的剪切速率计算结果如图5(b)所示,计算结果与卫星遥感资料在海冰演化趋势上相吻合。由此可见,通过在拉格朗日坐标下对海冰的离散化处理,可对大尺度冰块间的接触、摩擦、形变等动力破碎现象进行相对精确的数值分析,特别是对水道、冰脊等现象的非线性、各向异性力学行为进行更为合理的确定。

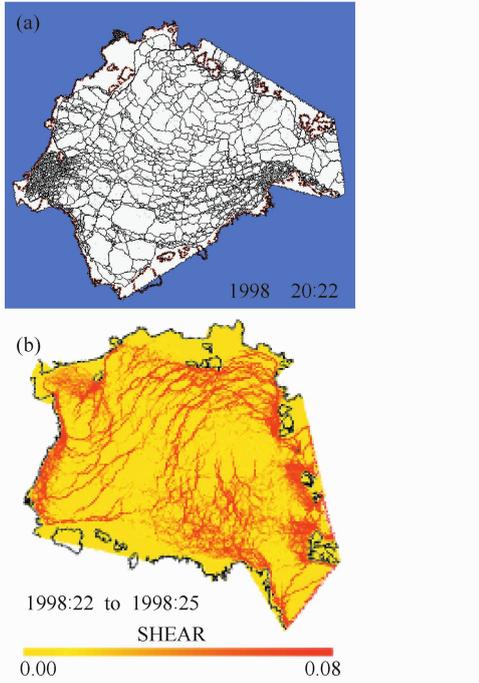


图5 极区海冰离散元模拟的初始场(1998年1月20日)及在3 d内的剪切速率(km/d)

Fig. 5. Initial sea ice field for the discrete element simulation in the Arctic (January 20, 1998) and the shear rate in 3 days (km/d)

1.2.3 基于离散介质力学的海冰流变学本构模型

在地球物理尺度下,由于研究区域远远大于离散状态下海冰的尺度,因此在海冰数值模式中多采用连续介质模型,并通过对海冰流变学的研究建立相应的本构模型。针对海冰的离散分布特性及其类似于颗粒介质的力学行为,发展了基于颗粒介质理论的海冰动力学粘塑性本构模型^[1-2]。通过采用圆盘离散单元对海冰的碰撞过程进行数值分析,建立了二维的冰块碰撞流变学模型^[2]。其中,粘性系数和强度是冰块大小、厚度和回弹系数等的函数,并分别写作:

$$\eta = \frac{\gamma(1+e)}{3\pi} \frac{v'}{d}, \quad \zeta = 3\eta \quad (1)$$

$$P = \frac{\gamma\sqrt{2}(1+e)}{\pi^2} \left(\frac{v'}{d}\right)^2 \quad (2)$$

这里,

$$\gamma = \frac{\rho_i D^2 h_i}{4} \frac{C_0^{\frac{3}{2}}}{C_0^{\frac{3}{2}} - C^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

式中, ζ 和 η 分别为体积和剪切粘性系数; P 为海冰强度; $e = \frac{v_i}{v_0}$ 为回弹系数($0 < e < 1$),这里 v_i, v_0 是冰

块碰撞前和碰撞后的法向相对速度; v' 为冰块运动的波动分量; d 为冰块直径; ρ_i 为海冰密度; C_0 为海冰的最大密集度; C 为海冰密集度; D 为冰块尺度; h_i 为冰厚。

采用以上粘塑性海冰本构模型,对一定区域内的海冰运动进行 Monte Carlo 数值模拟,经统计后得到的海冰塑性屈服曲线和不同应力状态的应变率矢量如图6所示,这里 $C = 0.8, e = 0.1$ 。图中无量纲主应力定义为:

$$S_{1,2} = \frac{\sigma_{1,2}}{\rho_i D^2 h_i (\dot{\epsilon}_1^2 + \dot{\epsilon}_2^2)} \quad (4)$$

式中, $\sigma_{1,2}$ 和 $\dot{\epsilon}_{1,2}$ 分别为第一和第二主应力和主应变率。

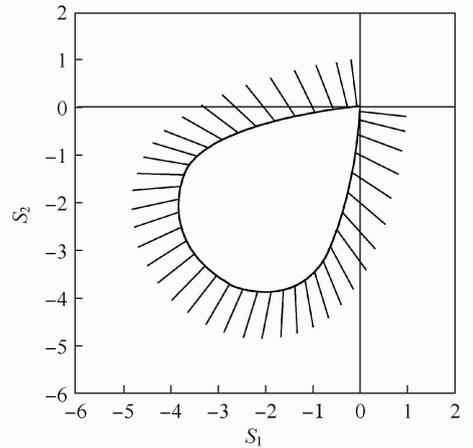


图6 基于海冰碰撞流变学的屈服曲线^[2]

Fig. 6. Yield curve based on sea ice floe contact rheology^[2]

采用海冰块体离散元模型,并考虑海冰在动力过程中的能量守恒, Hopkins^[6]在中尺度(10—100 km)下进行了一系列数值模拟实验,并对计算区域内海冰应力进行了统计分析。在不同初始密集度下得到海冰的屈服曲线,该屈服曲线能够很好地反应海冰在动力过程中的应力状态^[29]。

最近,基于离散介质力学理论,一系列的海冰本构模型建立并应用于大中尺度下的海冰动力学数值模拟中^[30-31]。Feltham^[32-33]研究小组针对冰缘区海冰的离散分布特性,开展了一系列相关研究。虽然这些本构模型并不考虑细观尺度下海冰的分布形态、碰撞接触作用,其计算参数也不考虑海冰类型、冰块尺寸等细观因素的影响,但它们将海冰视为离散介质材料,其流变学行为更符合实际情况下海冰的非连续力学行为。

1.2.4 基于改进离散单元模型的海冰动力学模拟

海冰动力学的离散单元模型在本构模型和计算方法方面都有异于传统的粘塑性和弹塑性本构模型。大量的数值试验表明颗粒流模型能够合理地模拟海冰动力学过程中的断裂、重叠和堆积现象,具有物理意义明确、计算精度高的优点。但海冰离散单元模型以冰块为研究对象,其计算量大,这在一定程度上限制了它在大、中尺度下海冰动力学模拟中的应用。另外,由于它需要输入精确的海冰初始信息,这在实时海冰监测工作中也有很大的困难。因此,在保证颗粒流模型计算精度的前提下,提高计算时效和简化输入参数是必要的。最近,在海冰动

力学离散单元模型中考虑了SPH方法的思想,将每个海冰单元设为诸多冰块的集合体,其力学性质受冰厚、密集度等因素的影响^[34]。因此,这里的海冰单元不是冰块,而是具有一定统计特性的碎冰组合体。该改进的离散单元模型的最大特点是单元相互作用中考虑海冰重叠和堆积过程的塑性变性。

由于海冰单元是诸多冰块的集合体,因此它在动力演化过程中会发生尺度的变化。由于海冰单元在尺度变化过程中总质量恒定,因此其密集度和厚度会发生相应变化。海冰单元尺度变化及相应密集度和厚度的变化示意图如图7所示。由此可以描述海冰在风和流的作用下的辐合和辐散过程。

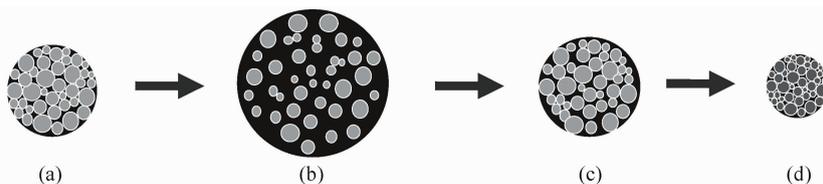


图7 改进的海冰离散单元模型中单元尺度变化过程示意图^[34]

Fig.7. Diagram of sea ice element size changing in the modified discrete element model^[34]

在海冰外力和内力的作用下,海冰单元的大小会发生变化并保持质量不变,由此引起单元冰厚和密集度的变化。在不同的海冰密集度下,海冰单元的力学性质有很大的差异。以海冰单元的法向刚度为例,当海冰单元的密集度为 N_i 时,其单元刚度可设为

$$K_n = Eh_i \left(\frac{N_i}{N_{\max}} \right)^j \quad (5)$$

式中, E 为海冰弹性模量, h_i 为海冰平均厚度, N_{\max} 最大密集度, j 为经验参数,可取为 $j=15$ ^[35-36]。

单元间的最大法向作用力受单元塑性变形控制,并在竖直方向存在静水压力项,此时海冰应力达到其屈服极限应用 σ_p 。当海冰应力达到其屈服应力 σ_p 时,颗粒单元发生塑性变形并导致单元大小发生变化,这表明海冰会发生重叠或堆积现象。

旋转风场下的海冰动力学过程是一个典型的检验海冰数值方法及本构模型的算例^[37]。采用改进的DEM模型对海冰的动力过程进行数值模拟,计算中取海冰单元的初始尺寸为5.0 km,时间步长为6 s。计算得到的第5天的海冰速度和密集度分布如图8所示。从海冰单元位置和冰速分布规律来看,海冰的漂移趋势基本与风场一致;从海冰密集度分

布来看,冰区左岸有明显的堆积现象,即辐合过程,而在冰区右岸则有离岸漂移的趋势。由此可见,采用离散元模拟可精确地确定海冰的演化规律,特别是在冰水交界处具有更高的计算精度,也能够更加准确地描述海冰的分布位置。

2 浮冰块尺度下海冰的离散元模型

在浮冰块尺度下,海冰的离散分布特性主要表现为海冰的断裂、重叠和堆积以及海冰与波浪的相互作用。海冰重叠和堆积过程非常复杂,且对海冰与大气、海洋间的热力和动力作用,以及海冰厚度、密集度的重新分布都有着重要的影响,同时也对冰区结构物构成很大的威胁。在极区,堆积冰覆盖面积在不同季节有所差别,一般可占总冰面积的10%—40%,而冰量所占比例可达70%^[38-39]。冰脊在Baltic海、Bering海、Beaufort海、Okhotsk海以及中国渤海等都十分常见^[40-42]。海冰块体离散元方法可合理地模拟海冰断裂、重叠和堆积的动力过程。

2.1 浮冰块尺度下海冰的离散分布特性

在自然条件下,海冰已表现出不连续分布特性,当发生断裂、重叠和堆积现象时,离散性表现得

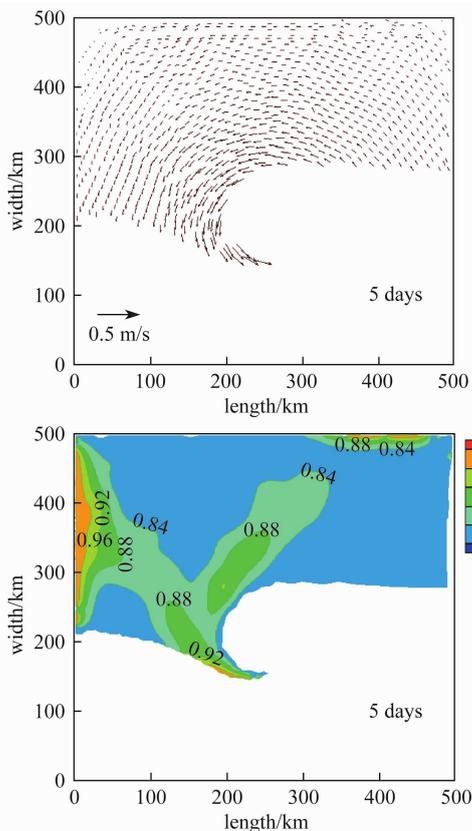


图8 旋转风场作用下海冰的速度及密集度分布^[34]

Fig. 8. Distributions of sea ice velocity and concentration in vortex wind field^[34]

更为突出。当冰块厚度均一时,海冰较易发生重叠;反之,则易形成冰脊^[43]。海冰在浮冰块尺度下的离散特性早就引起了人们的注意,并最早于20世纪70年代开始考虑冰块间的相互碰撞过程^[44]。同时,浮冰块在波浪作用下断裂、破碎以及冰块间相互碰撞造成冰类型变化,并直接影响风和流的拖曳系数等动力因素。

在渤海,海冰在波浪、潮汐、海浪等海洋动力条件下,并受海岸边界约束和海冰内力的影响,具有强烈的破碎、重叠和堆积特性。目前,对辽东湾沿岸冰的海冰堆积特性进行了现场调查,获得了不同起伏程度的堆积冰表面轮廓剖面,分析了堆积冰的形态特征以及冰脊内部层状结构和破碎冰块尺寸^[45]。渤海油气平台上的海冰现场观测表明,平整冰在波浪作用下会发生多次破碎并会在平静海面上再次冻结(如图9),重叠冰和冰脊也经常出现。图10为半径为6海里的辽东湾JZ20-2海域的海冰雷达监测图像,从中可以清晰地发现海冰在冰块尺度下的离

散分布规律。



图9 渤海莲叶冰的现场照片

Fig. 9. Pancake ice picture in the Bohai Sea

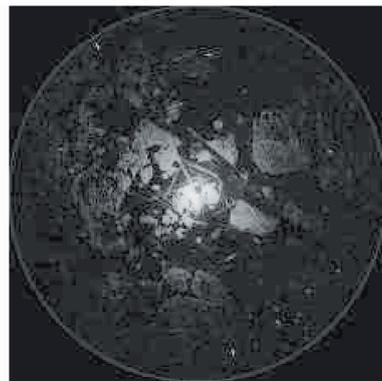


图10 辽东湾JZ20-2海域的海冰雷达监测图像

Fig. 10. Sea ice radar image in the JZ20-2 area of the Liaodong Bay

2.2 海冰重叠和堆积的离散元模拟

在海冰重叠和堆积的动力过程的离散元模拟中,冰脊被离散为若干个不同尺寸、形状的冰块,并采用基于Mohr-Coulomb摩擦准则的粘弹性本构模型计算冰块间的相互作用。该方法能够很好地描述冰脊内部冰块的结构特性,计算结果也较好地与实测结果相吻合。近20年来,Hopkins等^[7,40,46]采用离散单元模型对海冰的重叠和堆积过程进行了数值模拟,单元形状也由最初的二维圆盘模型发展为二维块体模型,并取得了理想的计算结果。采用该计算模型,对斜面式防波堤和半圆型防波堤结构前的海冰堆积过程进行了数值模拟,计算结果与试验值相一致^[47-48]。

在海冰的块体离散单元模型中,冰块间的相互作用主要表现为弹力、粘力以及冰块间的滑动摩擦。该模型不仅可用于中尺度下冰脊的形成、冰隙的产生以及冰缘区的海冰演化过程^[6,23],还可以考虑海冰单元间因冻结而产生的粘接作用,又可应用于极

区大尺度下的海冰动力过程模拟^[27,49-50]。不同尺度下的海冰离散元模拟结果可通过室内模型实验或现场观测资料进行验证^[6,23,27,51]。

对于冰脊的形成过程,当薄冰与厚冰相互挤压时易形成冰脊。计算中进行了如下两点假设:一是薄冰受弯或屈曲破碎;二是厚冰有足够的承载力。计算结果表明成脊过程大体可以分为四个阶段^[7]。第一阶段,平整冰作用于厚冰上发生破碎并形成稳定的帆高;第二阶段,龙骨不断增厚并达到稳定;第三阶段,冰脊不断扩展,形成厚度相对均匀的碎冰区;第四阶段,碎冰区受压密实。采用2 m厚的厚冰和0.5 m厚的薄冰,形成的冰脊剖面如图11所示。在成脊过程中,水平作用力 F 与薄冰厚度 h 、薄冰成脊长度 L 等因素密切相关,并在不同成脊阶段有不同的对应关系。可以发现,成脊过程中的作用力主要分为两个阶段。第一阶段,海冰以屈曲破坏为主,此时水平作用力 $F = \alpha h^{1.5} L^{0.5}$,这里 F 单位为kN,待定系数 $\alpha = 7\ 300$;第二阶段,即帆高形成后,开始形成龙骨,此时 $F/h^{1.5}$ 保持基本恒定,即: $F = \beta h^{1.5}$,这里 $\beta = 95\ 400$ ^[7]。

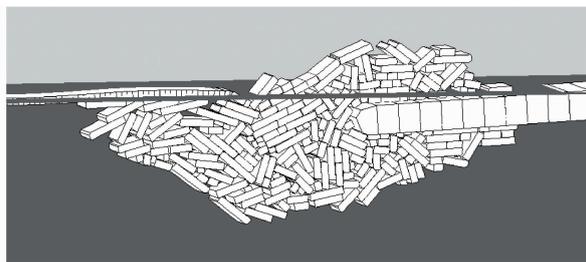


图11 海冰重叠和堆积过程的离散单元模拟^[7]
Fig. 11. Discrete element simulation of sea ice rafting and ridging process^[7]

2.3 浮冰块在波浪作用下动力过程的离散元模拟

海冰在波浪和潮汐等竖向波动力下会发生弯曲和拉伸破碎,冰块尺寸也形成一定的分布规律^[9,52]。渤海海冰在波浪作用下具有显著的破碎特性,形成不规则的碎冰和相对规则的莲叶冰,并在平静的海面再次重结,如图12所示。

针对碎冰区海冰的动力特性,人们建立了一系列的离散单元方法用于模拟海冰与波浪的相互作用以及碎冰对海洋结构的作用力^[8,53-54]。Hopkins和Shen^[55]采用三维圆盘离散单元模型对海冰与波浪的相互作用进行了模拟,取得了理想的计算结果,该模型还进一步应用于海冰重叠厚度的确定。



(a) 初生莲叶冰



(b) 海冰破碎

图12 渤海海冰在波浪条件下的生成与破碎

Fig. 12. Growth and breakup of sea ice under wave conditions in the Bohai Sea. (a) Initial pancake ice; (b) Breakup of ice cover

该圆盘单元通过数学定义构造单元形态,然后向其填充无限多个球形颗粒。这样就可通过计算颗粒间的相互接触以描述单元点间的作用过程。由于球形颗粒在判断接触和计算作用力方面具有计算简便的优点,进而可以对具有复杂结构的离散单元动力过程进行快速高效的数值计算。该三维圆盘单元如图13所示,主要由上下两个圆形平面和半球围成的圆周组成,涉及两个几何参数: r_1 和 r_2 ,其中 r_1 是

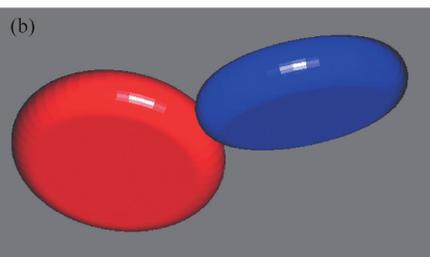
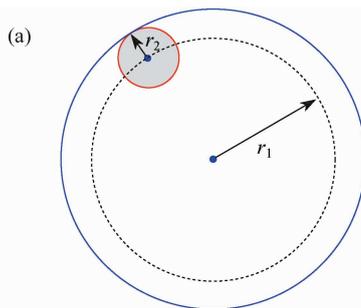


图13 海冰3D圆盘单元的构建

Fig. 13. Construction of sea ice disk element in 3 dimensions

内部球形颗粒的半径, r_2 是圆盘弧形表面的弧面半径。单元的局部坐标用于描述每个圆盘单元的相对姿态, 整体坐标用于确定每个圆盘单元的运动轨迹和相对位置。

接触的判断是离散元计算中最繁琐也是计算量最大的一部分工作。在三维圆盘单元的相互接触中主要有两类接触形式, 即面接触和点接触。由于圆盘模型是由若干个虚拟的球体颗粒组合而成, 圆盘单元间的接触和作用力均是通过判断两个球体颗粒的接触而实现。为确定任意两个圆盘单元内球体颗粒的接触情况, 这里引入弹性带的概念。假设两个圆盘单元上任意两点的坐标矢量为 P_1 和 P_2 , 在两个坐标点之间定义一个弹性带。该弹性带具有一定的弹性势能, 可带动两个球体颗粒在圆盘圆周上做无滑动运动, 并使其弹性势能最小时达到稳定。此时, 由这两个球体颗粒所在的位置可判断两个圆盘单元是否接触, 并在发生接触的情况下计算作用力。

当两个三维圆盘发生接触时, 其单元间的重叠量为

$$|\delta_{ij}| = |\Delta_{ij}| - r_2^i - r_2^j \quad (6)$$

式中, δ_{ij} 是 i, j 两个圆盘间的重叠量, Δ_{ij} 是圆盘的中心面圆盘间的距离。

圆盘单元间的法向力为

$$F_n^n = k_{nc}\delta_{ij} - \eta V_{ij} \cdot n \quad (7)$$

式中, F_n^n 为 n 时刻颗粒接触间的法向接触力, k_{nc} 为法向接触刚度, η 为接触粘滞系数, V_{ij} 是接触面间的相对速度, n 为接触面的法向单位矢量。

圆盘单元间的切向力为

$$F_t^n = \min((F_t^{n-1} - k_{tc}\Delta t(V_{ij} \cdot t)), \mu F_n^n) \quad (8)$$

式中, F_t^n 和 F_t^{n-1} 分别为 n 和 $n-1$ 时刻的切向力, k_{tc} 为颗粒间的切向刚度, 可设为法向刚度的 60%^[6]; Δt 是数值模拟中的时间步长; t 为接触面间的切向单位矢量, μ 是接触面间的滑动摩擦系数。此外, 当海冰在海水中按一定的加速度运动时, 其惯性力会明显增加。这时还需考虑其附加质量。

采用以上海冰和波浪的计算模型对海冰的动力堆积过程进行了数值模拟, 结果如图 14 所示, 同时还得到了海冰对直立结构的作用力^[55]。在此基础上, 进一步考虑冰块间的冻结作用, 可研究海冰热力因素对波浪条件下海冰动力特性的影响。此外, 采用以上三维圆盘模型, 对海冰在波浪作用下的重叠和堆积厚进行了计算, 确定了碎冰在波浪作用下的

堆积形态和厚度分布^[8,56]。最近, 采用颗粒离散单元模型, 对波浪作用下冰盖的破碎过程进行了数值模拟, 并在破碎长度和波高之间的对应关系方面取得了初步的研究成果^[57]。

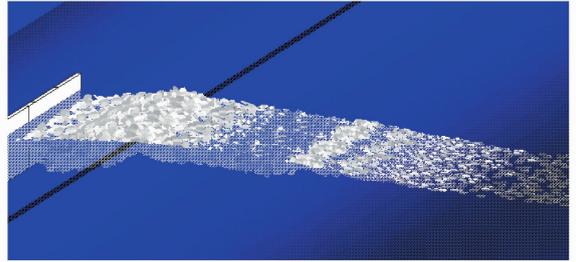


图 14 海冰在波浪作用下的堆积过程
Fig. 14. Sea ice ridging process under wave action

3 海洋结构尺度下海冰的离散元模型

在海洋结构尺度下, 海冰的离散行为表现为海冰与海洋结构相互动力作用中的海冰破碎现象, 并主要集中在海冰的挤压或弯曲破坏过程, 此时冰荷载在海冰破碎过程中表现出明显的周期性。针对海冰对不同类型海洋结构的动力作用特性, 采用具有粘接效应的颗粒离散单元模型对冰荷载进行数值分析。

3.1 海洋结构尺度下海冰的离散分布特性

海冰与结构物相互作用产生的冰荷载, 一方面决定于海冰的类型、强度、速度等海冰参数, 同时也与结构的形式(锥体、直立腿)、刚度、尺寸等结构参数相关。海冰参数和结构形式的不同, 会导致海冰的挤压、屈曲、弯曲、断裂等不同破坏模式。不管是何种破坏模式, 海冰均会表现由连续体到离散体的转变, 如图 15 所示。当然, 海冰在宏观上表现出来的这些力学行为是由其在微观尺度下的结构变化和损伤决定的。

对于直立结构, 在不同的冰速下, 海冰有三种挤压破碎模式, 即慢冰速下的准静态韧性破坏、中冰速下的韧脆转化破坏和快冰速下的脆性破坏。在对海冰的脆性破坏研究中, 建立了如图 16 所示的挤压破碎物理过程。海冰与结构接触表面的压力在时间和空间上都有很大的变化^[58]。对于锥体结构, 海冰以弯曲破坏为主。海冰在弯曲破碎过程中, 破碎的冰块将在后续冰的推动下沿锥体上爬, 最后冰块将滑下锥体而被清除。整个过程可以分为以下三个阶

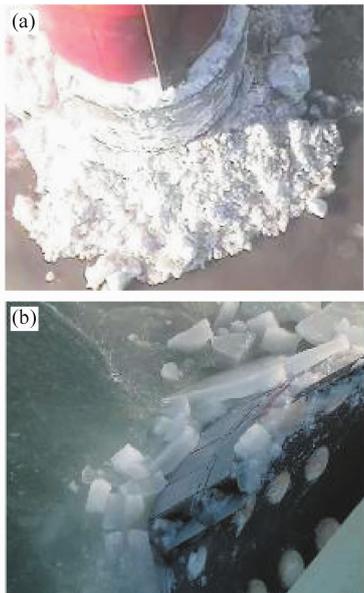


图 15 海冰与直立腿和锥体结构作用时的挤压弯曲破坏
Fig. 15. Compressive and flexural failures of sea ice cover during the interactions with vertical and conical structures

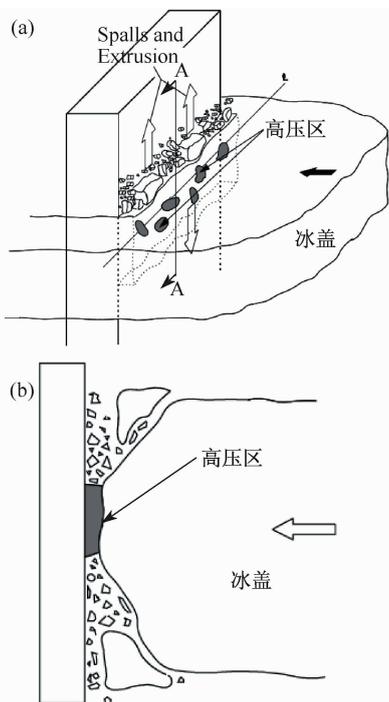


图 16 海冰与直立结构相互作用时的挤压破坏
Fig. 16. Compressive failure of sea ice in the interaction with vertical structure

段,即:弯曲破坏阶段、海冰上爬阶段和清除卸载阶段。海冰在与锥体作用时首先产生径向裂纹,然后产生环向断裂。其中径向裂纹为非同时发生,但环向裂纹为同时发生。当冰板发生环向裂纹后,形成

若干个楔形体。当然,在不同的锥角、锥径和冰厚下,海冰的破坏模式有一定的差异。典型的冰板弯曲破坏过程如图 17 所示。海冰在以上弯曲破坏过程中会产生相应的动冰力,该冰力时程与冰厚、冰速有着密切的关系。

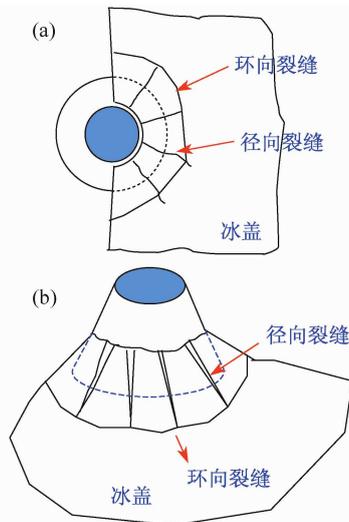


图 17 海冰与锥体结构相互作用时的弯曲破坏^[59]
Fig. 17. Bending failure of sea ice in the interaction with conical structure^[59]

由此可见,海冰与不同类型海洋结构物作用过程中均伴随海冰的破碎过程,并产生相应的动冰力。可针对海冰破碎的离散分布规律,发展相应的粘接单元模型以及离散单元模型进行冰荷载特性的数值研究。

3.2 海冰与结构相互作用的颗粒离散元模型

海冰荷载的离散元模型可依据单元的形态分为颗粒离散元^[60]和块体离散元^[6,61-62]两类。在块体离散元模型中,由于海冰在厚度方向设为单层单元,不能描述冰排在厚度方向的破碎过程。在颗粒离散元模型中,冰排可依据冰晶结构特点由多个球形颗粒粘接而成。通过颗粒材料性质及单元间粘接强度的设定,描述冰排的不同破碎模型。这里主要介绍颗粒离散元模型在海冰与海洋平台相互作用中的研究。

3.2.1 海冰颗粒离散元模型

在颗粒相互碰撞的过程中,一般考虑单元间因相对速度和弹性变形而引起的粘弹性作用力,以及采用 Mohr-Coulomb 摩擦定律的剪切力^[63-64]。两个颗粒单元的接触模型如图 18 所示。

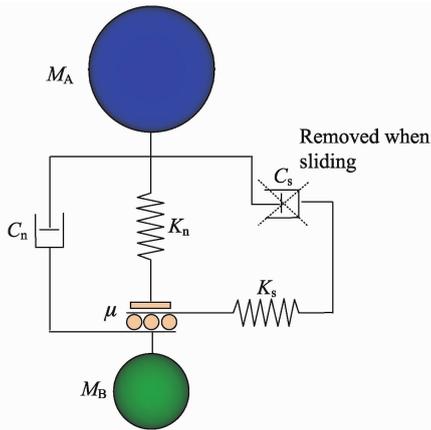


图 18 颗粒接触的力学模型^[63]. M_A 和 M_B 分别为两个球单元的质量, K_n 和 K_s 分别为法向和切向刚度系数, C_n 和 C_s 分别为法向和切向阻尼系数, μ 为摩擦系数
Fig. 18. Contact force model of particle element^[63]

考虑颗粒间的冻结作用,还应建立颗粒的平行粘接模型。两个粘接颗粒单元间设定为弹性粘接圆盘,可以传递两个单元间的作用力和力矩,即拉力、剪力、弯矩和扭矩。以上作用力在粘接圆盘上产生相应的正应力和剪应力。粘接圆盘上的最大拉应力和剪应力依据梁的拉伸、扭转和弯曲理论按下式计算^[65]:

$$\sigma_{\max} = \frac{-\bar{F}^n}{A} + \frac{|\bar{M}_i^s|}{I} \bar{R}, \tau_{\max} = \frac{|\bar{F}_i^s|}{A} + \frac{|\bar{M}_i^n|}{J} \bar{R} \quad (9)$$

式中, A 、 J 和 I 分别为平行接触圆盘的面积、极惯性矩和惯性矩,有 $A = \pi \bar{R}^2$, $J = 1/2 \pi \bar{R}^4$, $I = 1/4 \pi \bar{R}^4$ 。 \bar{F}_i^n 和 \bar{F}_i^s 分别为法向和切向作用力, \bar{M}_i^n 和 \bar{M}_i^s 分别为粘接圆盘上的扭矩和力矩。当最大拉伸和剪应力超过其拉伸强度和剪切强度时粘单元将断开。

3.2.2 海冰与海洋结构相互作用的离散元模拟

在海冰与直立腿结构相互作用过程中,海冰以挤压破碎为主。在该计算过程中,将冰层离散为若干个冻结在一起的颗粒单元,直立腿结构视为刚体,具有一定的质量、刚度和阻尼特性^[66]。采用颗粒离散元模型模拟的海冰与直立腿结构相互作用过程如图 19。图中颗粒颜色代表颗粒平均作用力,也反应了冰内应力场的大致分布规律。计算中颗粒单元直径为 0.1 m,冰厚为 0.26 m,单元数目 7 200,桩径为 1.6 m,结构质量为 300 t,结构阻尼比为 0.03,结构刚度为 5.0×10^5 kN/m。依此计算得到的水平方

向的桩腿冰力时程如图 20 所示,其中最大冰力为 87.45 kN,均值为 35.29 kN。在此基础上,还对冰致结构振动位移和加速度进行了计算,并分析了不同粘接强度、桩径等参数对冰荷载的影响。该离散元模型定性反映了冰激直立结构的冰荷载及结构冰振响应。

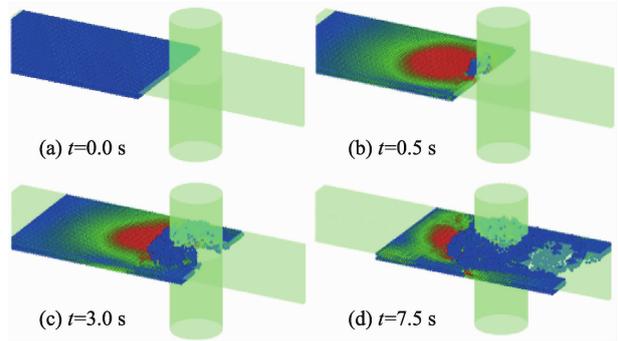


图 19 海冰与直立结构相互作用过程的离散元数值模拟^[66]
Fig. 19. Interaction between sea ice and vertical structure simulated with discrete element model^[66]

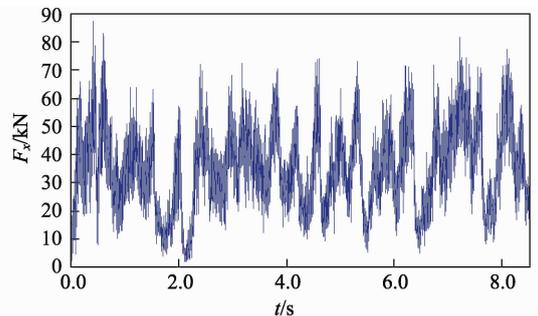


图 20 颗粒离散元模拟的直立腿结构水平方向冰荷载^[66]
Fig. 20. Ice load on vertical structure in horizontal direction simulated with discrete element model^[66]

在海冰与锥体结构的相互作用中,海冰以弯曲破碎为主。采用海冰颗粒离散元模型对海冰与锥体结构的相互作用过程也可进行数值分析,从微观尺度模拟海冰的破碎过程,进而合理地确定锥体结构的冰荷载。

3.3 海冰与结构相互作用的块体离散元模型

为模拟海冰与海洋结构的动力作用过程,采用块体单元模型进行了数值分析。在海冰与直立结构的作用过程中,海冰明显破碎为细小碎块,同时产生动冰荷载,可得到海冰与结构作用时的应力分布,如图 21 所示^[12]。图中结构宽度为 1.8 m,高度 19 m,冰厚 1 m,冰排长度为 54 m。此外,为研究碎冰的承压性能,采用块体离散元方法对其受压过程进行了

离散元数值模拟^[62]。根据海冰的离散分布特性,以及单个冰块的几何特点,建立的海冰初始分布如图 22 所示。数值计算中所采用的计算参数,初始冰厚、冰密度、摩擦系数、龙骨深度等均采用实测资料。采用该模型计算得到了压力随加载位移的对应关系,并分析了冰块间的冻结强度、摩擦系数等影响海冰强度的重要因素。此外,采用三维块体离散元模型(DEICE 3D),对海冰与锥体结构的相互作用进行了数值模拟(如图 23 所示),计算结果同试验和现场测量结果比较一致^[13]。类似于离散元方法,一种粘接单元方法也用于计算海冰与直立和锥体结构的相互作用,并确定了结构物上的应力分布,如图 24 所示^[67-68]。由此可见,在海冰与结构的相互作用中,离散单元模型能够更加合理地模拟海冰破碎的物理过程,进而对不同类型海洋结构的冰荷载进行确定。

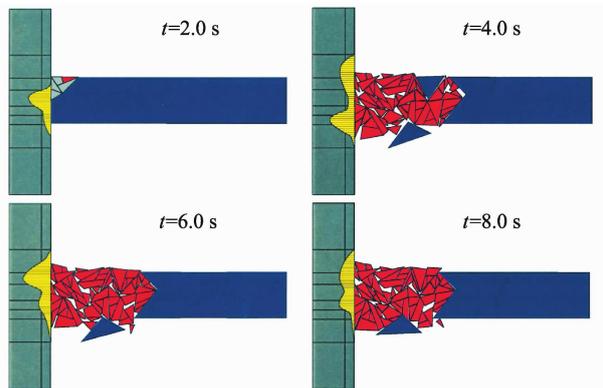


图 21 海冰与直立结构相互作用的离散单元模拟
Fig. 21. Interaction between sea ice and vertical structure simulated with discrete element

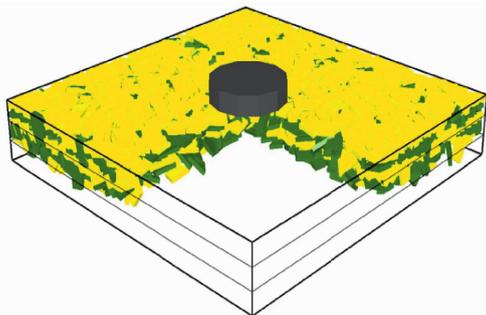


图 22 冰脊龙骨冲压试验的离散单元模拟^[62]
Fig. 22. Discrete element simulation of penetration test on ridge keel^[62]

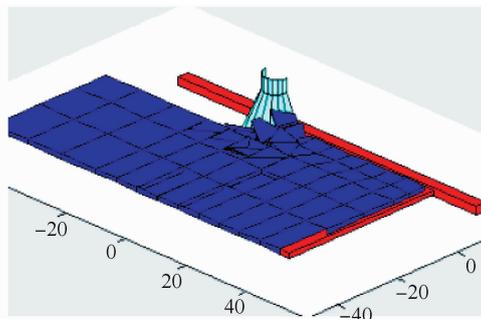


图 23 海冰对锥体结构作用的 DEICE 3D 离散单元模拟^[13]
Fig. 23. Discrete element simulation of interaction between sea ice and conical structure with DEICE 3D^[13]

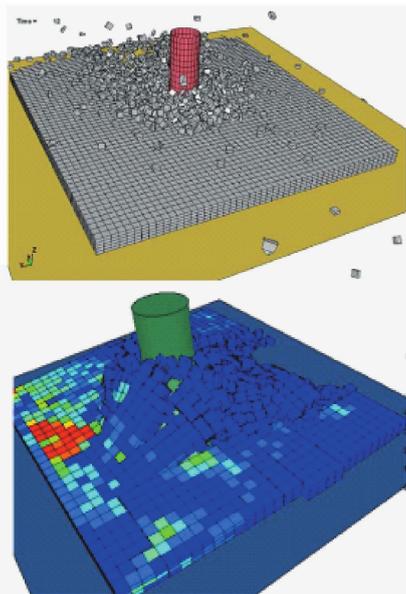


图 24 海冰与海洋结构相互作用的粘接单元模型
Fig. 24. Cohesive element model for interaction between sea ice and offshore structures

4 海冰强度的尺度效应

海冰在不同尺度下的力学性质有很大的差异,表现出明显的尺度效应。近 10 多年来,海冰的这种尺度效应引起了人们的重视^[15,17]。就海冰工程而言,人们更多地关心 1—10 m 尺度的海冰力学性质,如冰与结构物的相互作用;对于海冰动力学而言,则是在 10—10³ km 的尺度上进行研究,如极区及副极区的海冰运移演化规律;然而,对于 100—1 000 m 尺度下的中尺度海冰力学性质,目前研究的还比较少^[14]。除此之外,在海冰物理力学性质研究中,人

们也一直关注冰晶尺度的细观力学研究。

在海冰尺度效应研究中,人们最关注的问题就是海冰的强度。对于局部强度,可以通过室内或现场力学试验的方式进行测量。然而,对于大中尺度海冰强度,则需要通过数值模式的敏度分析进行确定。室内小尺度下的实验结果表明,海冰强度在10 MPa左右;在海冰与结构物相互作用时的全尺度测量结果表明,海冰强度的均值在1 MPa左右^[16];对于地球物理尺度,海冰强度则在10—100 kPa。图25中给出了不同尺度下海冰强度的分布规律,可以发现其随尺度的增加呈双对数递减趋势^[14,16-17]。图中A组数据来源于室内S-2冰的测试结果,B组数据来源于中尺度下海冰对灯塔、桥墩、码头等结构物的现场试验结果,C组数据来源于海冰对人工岛和自然岛屿作用的分析结果,D组数据为Baltic海的海冰动力学测量结果,E组数据来源于对极区海冰动力学数值模拟中所选用的海冰强度。以上海冰强度 σ 与尺度 L 之间的关系可以表述为: $\sigma(L) \propto L^n$,这里 $n \approx -0.5$ ^[12]。

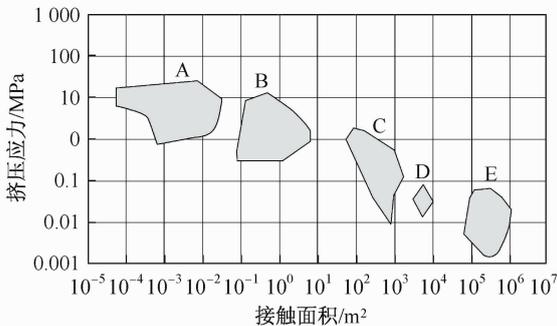


图25 不同尺度下海冰的强度变化^[12]

Fig. 25. Changing of sea ice strength on various scales^[12]

强度随尺度的增大而降低的现象广泛存在于不同材料中。这主要是由于随着尺度的增大材料内部的缺陷会不断增加,从而导致其平均强度降低。在地球物理尺度下,重叠冰、冰脊和水道的存在是导致海冰强度降低的主要原因。为研究自然条件下海冰的动力学行为,人们对极区及副极区海冰动力过程中的应变(率)、应力和强度等力学参数,以及厚度、漂移速度和冰块尺寸等物理特征进行了现场浮标测量、雷达和卫星遥感监测。海冰在不同尺度下不仅强度有很大的不同,其平均状态也有很大的差异。通过采用卫星遥感资料和海冰数值模拟,可以发现10—1 000 km 范围内平均应变率随尺度的增大

而呈负指数降低,有: $\langle \dot{\epsilon}_{tot} \rangle \sim L^{-\beta}$,这里 β 为0.1—0.18^[69-70]。

尽管海冰在不同尺度下的强度有很大差异,但由于它们均具有相似的离散分布特性,因此其力学性质具有很强的相似性。在地球物理尺度和冰晶尺度下,海冰具有相似的断裂形态、冰块和冰晶具有相似的尺度分布规律。从这个角度说明,海冰具有很强的自相似性^[17,71]。

5 结语及展望

自然条件下,海冰在不同尺度下均呈现很强的离散特性。依据海冰研究的问题,可将海冰分为地球物理尺度、浮冰块尺度、海洋结构尺度、海冰模型试验尺度和细观材料尺度。针对海冰在不同尺度下的离散分布特性,人们建立了块体、圆盘和颗粒等不同形态的离散元模型。采用块体模型,对极区大尺度海冰的动力过程进行了数值模拟,也成功地应用于海冰重叠和堆积过程的数值模型中。采用圆盘模型,对海冰在波浪作用下与结构体的作用进行了数值模拟。采用颗粒模型,对海冰与直立和锥体结构相互作用过程进行了计算,得到了单桩腿结构上的动冰力和冰激结构振动响应。最后,讨论了海冰强度的尺度效应,即海冰强度随尺度的增加呈双对数降低特性。

离散元模型在不同尺度下的海冰问题研究中得到了广泛的应用,并呈现出良好的应用前景。针对当前中国渤海油气开发中海冰研究的工程需求,以及北极航运、气候变化等海冰问题的研究状况,在海冰离散元模型中的计算参数确定、高性能计算、离散元模型的改进、基于离散介质的本构模型等方面还需要重点开展以下工作。

(1) 海冰离散单元模型中计算参数的确定。在海冰的离散单元模拟中,海冰单元间的粘接强度、接触刚度、摩擦系数和粘滞系数等计算参数与海冰类型、冰温、盐度等参数密切相关。目前,不同尺度下海冰离散单元模拟中的计算参数大多采用敏度分析的方法,或通过与试验结果的对比进行确定。这在一定程度上还存在很大的盲目性和随机性。如何合理地确定不同尺度下海冰离散单元模型中的计算参数,是目前海冰离散元数值模拟的重要问题。这也是离散元方法在不同应用领域所面临的一个主要研

究课题。

(2) 在海冰的离散单元模型中,计算效率是实现工程应用的一个瓶颈问题。目前,随着高性能 GPU 和多核 CPU 并行计算技术在离散单元模型中的发展,大规模、高性能的离散单元数值计算已广泛地应用于不同实际问题。因此,在海冰的离散单元数值模拟中也需要充分采用当前的高性能计算技术,开展大规模的离散单元数值计算,提高不同尺度下海冰离散元方法的计算效率。

(3) 海冰的离散单元模型以冰块为研究对象,由于单元数量众多,计算量大,在一定程度上限制了其在大中尺度下海冰动力学中的应用;另外,由于需要输入精确的海冰初始信息,这在海冰监测工作中也有很大的困难。因此,在保证离散元模型计算精度的前提下,可考虑将海冰单元设定为诸多冰块组

成的集合体,单元间的变形由其塑性屈服强度确定,由此计算海冰密集度和厚度的变化。也就是说,海冰单元是具有一定统计特性的碎冰组合体,可在海冰单元相互作用中描述海冰重叠和堆积过程的塑性变形。

(4) 作为一种典型的离散介质,海冰在宏观尺度下的流变学行为也具有相应的力学性质。虽然人们一直致力于建立适用于海冰非连续分布特性的本构模型,并通过离散单元方法建立了细观-宏观力学性质间的对应关系。但对于海冰在漂移、破碎、重叠和堆积过程中所表现出来的流动、阻塞过程中的类固-液行为,需要充分考虑海冰密集度、应变速率等因素的影响,建立一个适用于海冰在不同运动状态下的本构模型。

参考文献

- 1 Shen H H, Hibler W D, Lepparanta M. On applying granular flow theory to a deforming broken ice field. *Acta Mechanica*, 1986, 63(1-4): 143—160.
- 2 Shen H H, Hibler W D, Lepparanta M. The role of floe collisions in sea ice rheology. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(C10): 7085—7096.
- 3 Lu Q M, Larsen J, Tryde P. On the role of ice interaction due to floe collisions in marginal ice zone dynamics. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(C10): 14525—14537.
- 4 Lepparanta M, Lensu M, Lu Q M. Shear flow of sea ice in the Marginal Ice Zone with collision rheology. *Geophysica*, 1990, 25(1-2): 57—74.
- 5 Loset S. Discrete element modeling of a broken ice field-Part II: simulation of ice loads on a boom. *Cold Regions Science and Technology*, 1994, 22(4): 349—360.
- 6 Hopkins M A. On the mesoscale interaction of lead ice and floes. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(C8): 18315—18326.
- 7 Hopkins M A. Four stages of pressure ridging. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C10): 21883—21891.
- 8 Dai M R, Shen H H, Hopkins M A, et al. Wave rafting and the equilibrium pancake ice cover thickness. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(C7): 1—9.
- 9 Shen H H, Ackley S F, Yang Y. Limiting diameter of pancake ice. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(C12): 1—10.
- 10 Hopkins M A, Frankenstein S, Thorndike A S. Formation of an aggregate scale in Arctic sea ice. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(C10): 1—10.
- 11 Wilchinsky A V, Feltham D L. Modelling the rheology of sea ice as a collection of diamond-shaped floes. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2006, 138(1): 22—32.
- 12 Selvadurai A P S, Sepehr K. Two-dimensional discrete element simulations of ice-structure interaction. *International Journal of Solids and Structures*, 1999, 36(31-32): 4919—4940.
- 13 Lau M, Lawrence K P, Rothenburg L. Discrete element analysis of ice loads on ships and structures. *Ships and Offshore Structures*, 2011, 6(3): 211—221.
- 14 Lepparanta M. *The Drift of Sea Ice*. Chichester UK: Praxis Publishing, 2004.
- 15 Dempsey J P. Research trends in ice mechanics. *International Journal of Solids and Structures*, 2000, 37(1-2): 131—153.
- 16 Sanderson T J O. *Ice Mechanics-Risks to Offshore Structures*. London: Graham and Trotman, 1988.
- 17 Weiss J. Fracture and fragmentation of ice: a fractal analysis of scale invariance. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 68(17-18): 1975—2012.
- 18 Stern H L, Lindsay R W. Spacial scaling of Arctic sea ice deformation. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(C10): doi: 10.1029/

- 2009JC005380.
- 19 Davis N R, Wadhams P. A statistical analysis of Arctic pressure ridge morphology. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(C6): 10915—10926.
- 20 Weiss J, Schulson E, Stern H L. Sea ice rheology from in-situ, satellite and laboratory observations: fracture and friction. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 255(1-2): 1—8.
- 21 Schulson E M. Compressive shear faults within arctic sea ice: Fracture on scales large and small. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(C7): 1—23.
- 22 Korsnes R, Souza S R, Donangelo R, et al. Scaling in fracture and refreezing of sea ice. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2004, 331(1-2): 291—196.
- 23 Hopkins M A, Tuhkuri J, Lensu M. Rafting and riding of thin ice sheets. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(C6): 13605—13613.
- 24 Flato G M, Hibler W D III. Ridging and Strength in modeling the thickness distribution of Arctic sea ice. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(C9): 18611—18626.
- 25 Wilchinsky A V, Feltham D L, Hopkins M A. Effect of shear rupture on aggregate scale formation in sea ice. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(C10): C10002, doi: 10.1029/2009JC006043.
- 26 Wilchinsky A V, Feltham D L, Hopkins M A. Modelling the reorientation of sea-ice faults as the wind changes direction. *Annals of Glaciology*, 2011, 52(57): 83—90.
- 27 Hopkins M A. A discrete element Lagrangian sea ice model. *International Journal for Computer-Aided Engineering*, 2004, 21(2-4): 409—421.
- 28 Hopkins M A, Thorndike A S. Floe formation in Arctic sea ice. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(C11): doi: 10.1029/2005JC003352.
- 29 Hibler W D III. Sea ice fracturing on the large scale. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 68(17-18): 2013—2043.
- 30 Sedlacek J, Lemieux J F, Mysak L A, et al. The granular sea ice model in spherical coordinates and its application to a global climate model. *Journal of Climate*, 2007, 20(24): 5946—5961.
- 31 Wilchinsky A V, Feltham D L. Anisotropic model for granulated sea ice dynamics. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2006, 54(6): 1147—1185.
- 32 Feltham D L. Granular flow in the marginal ice zone. *Philosophical Transactions of the Royal Society A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2005, 363(1832): 1677—1700.
- 33 Feltham D L. Sea ice rheology. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2008, 40(1): 91—112.
- 34 Li B H, Li H, Liu Y, et al. A modified discrete element model for sea ice dynamics // *Proceedings of the 21st International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. Montreal, Canada, 2011.
- 35 季顺迎, 沈洪道, 王志联, 等. 基于 Mohr-Coulomb 准则的粘弹-塑性海冰动力学本构模型. *海洋学报*, 2005, 27(4): 19—30.
- 36 Shen H T, Chen Y C, Wake A, et al. Lagrangian discrete parcel simulation of river ice dynamics. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 1993, 3(4): 328—332.
- 37 Flato G M. A Particle-in-cell Sea-ice Model. *Atmosphere and Oceanography*, 1993, 31(3): 339—358.
- 38 Tin T, Jeffries M O. Morphology of deformed first-year sea ice features in the Southern Ocean. *Cold Regions and Technology*, 2003, 36(1-3): 141—163.
- 39 Marchenko A, Makshtas A. A dynamic model of ice ridge buildup. *Cold Regions Science and Technology*, 2005, 41(3): 175—188.
- 40 Hopkins M A, Tuhkuri J. Compression of floating ice fields. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(C7): 15815—15825.
- 41 Shiraswa K, Lepparanta M, Saloranta T, et al. The thickness of coastal fast ice in the Sea of Okhotsk. *Cold Regions Science and Technology*, 2005, 42(1): 25—40.
- 42 Lepparanta M, Lensu M, Kosloff P, et al. The life story of a first-year sea ice ridge. *Cold Regions Science and Technology*, 1995, 23(3): 279—290.
- 43 Lipscomb W H, Hunke E C, Maslowski W, et al. Ridging, strength, and stability in high-resolution sea ice models. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(C3): doi: 10.1029/2005JC003355.
- 44 Ovsienko S. Numerical modeling of the drift of ice. *Atmospheric and Oceanic Physics*, 1976, 12(11): 1201—1206.
- 45 王昕, 雷瑞波, 孔祥鹏, 等. 辽东湾近岸堆积冰表面形态特征分析. *海洋通报*, 2008, 27(5): 18—22.
- 46 Hopkins M A, Hibler W D III, Flato G M. On the numerical simulation of the sea ice ridging process. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(C3): 4809—4820.
- 47 王永学, 李春花, 孙鹤泉, 等. 斜坡式防波堤前海冰堆积数值模拟. *水利学报*, 2003, (6): 105—110.
- 48 李春花, 王永学, 李志军, 等. 半圆型防波堤前海冰堆积模拟. *海洋学报*, 2006, 28(4): 172—177.
- 49 Hoyland K V. Morphology and small-scale strength of ridges in the North-western Barents Sea. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 48

- (3): 169—187.
- 50 Hopkins M A. Discrete element modeling with dilated particles. *Engineering Computations*, 2004, 21(2-3-4): 422—430.
- 51 Hopkins M A. On the ridging of intact lead ice. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C8): 16351—16360.
- 52 Dumont D, Kohout A, Bertino L. A wave-based model for the marginal ice zone including a floe breaking parameterization. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C4): doi: 10.1029/2010JC006682.
- 53 Hansen E H, Løset S. Modelling floating offshore units moored in broken ice: model description. *Cold Regions Science and Technology*, 1999, 29(2): 97—106.
- 54 Hansen E H, Løset S. Modelling floating offshore units moored in broken ice: comparing simulations with ice tank tests. *Cold Regions Science and Technology*, 1999, 29(2): 107—119.
- 55 Hopkins M A, Shen H H. Simulation of pancake-ice dynamics in a wave field. *Annals of Glaciology*, 2001, 33(1): 355—360.
- 56 Shen H H. Validation of the DEM Application for Pancake Ice Using STAR-CCM+. Report of American Bureau of Shipping, 2011.
- 57 Xu Z J, Tartakovsky A M, Pan W X. Discrete-element model for the interaction between ocean waves and sea ice. *Physical Review E*, 2012, 85(1): 016703.
- 58 Jordaan I. Mechanics of ice-structure interaction. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 68(17-18): 1923—1960.
- 59 Qu Y, Yue Q J, Bi X J, et al. A random ice force model for narrow conical structures. *Cold Regions Science and Technology*, 2006, 45(3): 148—157.
- 60 Arenson L. Numerically modelling the strength of ice using discrete elements // *Proceedings of the 2nd PFC Symposium*. Kyoto, Japan, 2004.
- 61 Polojarvi A, Tuhkuri J. 3D discrete numerical modelling of ridge keek punch through tests. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 56(1): 18—29.
- 62 Lau M. Discrete element modeling of ship manoeuvring in ice. *Proceedings of the 18th IAHR Interaction Symposium on Ice*, 2006, 25—32.
- 63 季顺迎. 非均匀颗粒介质的类固-液相变行为及其本构方程. *力学学报*, 2007, 39(2): 223—237.
- 64 Babic M, Shen H H, Shen H T. The stress tensor in granular shear flows of uniform, deformable disks at high solids concentrations. *Journal of Fluid Mechanics*, 1990, 219(1): 81—118.
- 65 Itasca Consulting Group. User's manual: PFC3D-Particle Flow Code in 3 Dimensions. Minneapolis: Online Manual, 2004.
- 66 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, *工程力学*, 2011(待刊发).
- 67 Konuk I, Gurtner A, Yu S K. Study of dynamic ice and cylindrical structure interaction by the cohesive element method // *Proceedings of the 20th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. Lulea, Sweden, 2009.
- 68 Konuk I, Gurtner A, Yu S. A cohesive element framework for dynamic ice-structure interaction problems Part I: Review and formulation // *Proceedings of 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Honolulu, USA, 2009, OMAE2009—79262.
- 69 Girard L, Weiss J, Molines J M, et al. Evaluation of high-resolution sea ice models on the basis of statistical and scaling properties of Arctic sea ice drift and deformation. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(C8): C08015.
- 70 Girard L, Bouillon S, Weiss J, et al. A new modeling framework for sea-ice mechanics based on elasto-brittle rheology. *Annals of Glaciology*, 2011, 52(57): 123—132.
- 71 Schulson E M, Fort A L, Iliescu D, et al. Failure envelope of first-year Arctic sea ice: the role of friction in compressive fracture. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: C11S25.

A REVIEW OF ADVANCES IN SEA-ICE DISCRETE ELEMENT MODELS

Ji Shunying¹, Li Chunhua², Liu Yu²

(¹State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

²Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting, National Marine Environment Forecasting Center, Beijing 100081, China)

Abstract

To describe the discrete distribution of sea ice on different scales, sea-ice discrete element models have been developed since the 1980s. In this study, sea-ice scales are divided into a geophysical scale (~100 km), a floe

scale (~ 10 km), and a structure scale (~ 1 — 100 m). For each scale, the discrete distributions and dynamic processes from continuous to discrete states of sea ice are presented. Sea-ice discrete element models with element shapes of blocks, disks, and particles are introduced. The models' applications in the dynamic characteristics of sea ice in polar regions, the simulation of sea-ice rafting and ridging and the interaction with waves, the interaction between sea ice and structures, and sea-ice mechanical properties modeling are analyzed. Sea-ice strength related to scale effect is discussed. Future studies on sea-ice discrete element models are suggested.

Key words sea ice, discrete element models, scale effect



简讯

祝贺雷瑞波等4位同志获得“2011—2012年度极地研究青年优秀论文奖”

为了鼓励原创性研究,发掘和培育从事极地研究的青年人才,经过资格初审和函评,产生了6位“2011—2012年度极地研究青年优秀论文奖”候选人。最后经过专家会议答辩,评选出4篇2011—2012年《极地研究》和 *Advances in Polar Science* 青年优秀论文。获奖人员名单如下:

(1) 雷瑞波,男,中国极地研究中心, Thermodynamic processes of lake ice and landfast ice around Zhongshan Station, Antarctica (*Advances in Polar Science*, 2011年第3期);

(2) 王慧,女,武汉大学电信学院,亚暴等待时间的统计学分析:IMAGE卫星观测(*《极地研究》*,2011年第4期);

(3) 姚轶锋,男,中国科学院植物研究所, Pollen morphology of selected tundra plants from the high Arctic of Ny-Ålesund, Svalbard (*Advances in Polar Science*, 2012年第2期);

(4) 刘永芹,女,中国科学院海洋研究所, The distribution and demography of *Euphausia superba* in Prydz Bay during the austral summer 2002 (*Advances in Polar Science*, 2012年第1期)。

青年优秀论文获得者代表雷瑞波同志在“2012中国极地科学学术年会”作大会报告。在“2012中国极地科学学术年会”的闭幕会上,举行了青年优秀论文颁奖仪式。