

# 非冻结可破碎模型冰的实验设计与分析

冯 峰, 张承森, 王 超, 汪春辉\*, 郭春雨, 徐 佩

哈尔滨工程大学船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨  
Email: \*wangchunhui\_heu@163.edu.cn

收稿日期: 2020年8月13日; 录用日期: 2020年9月4日; 发布日期: 2020年9月11日

## 摘 要

船-冰模型试验按模型冰的种类可分为冰水池中的冻结模型冰试验和常规拖曳水池中的非冻结模型冰试验,但目前常规拖曳水池试验使用的模型冰不能满足破碎条件。本文在总结冰水池冻结模型冰特点和船-冰模型试验模型率的基础上研发出一种新的非冻结模型冰。根据国际拖曳水池会议推荐的试验方法对该非冻结模型冰进行单轴压缩和三点弯曲试验。结果显示在缩尺比1:30的情况下,该非冻结模型冰可以用于船-冰相互作用试验。

## 关键词

模型实验, 相似准则, 非冻结模型冰, 试验技术

# Experimental Design and Analysis of Breakable Artificial Model Ice

Feng Feng, Chengsen Zhang, Chao Wang, Chunhui Wang\*, Chunyu Guo, Pei Xu

College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang  
Email: \*wangchunhui\_heu@163.edu.cn

Received: Aug. 13<sup>th</sup>, 2020; accepted: Sep. 4<sup>th</sup>, 2020; published: Sep. 11<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

According to the type of model ice, the ship-ice model test can be divided into frozen model ice test in ice tank and artificial model ice test in conventional towing tank. In this paper, a new type of artificial model ice is developed on the basis of summarizing the characteristics of the model ice in ice tank and the model rate of the ship-ice model test. Uniaxial compression and three point bending tests were performed on the artificial model ice according to the test method recommended by the International Towing Tank Conference. The results show that the artificial model ice can be used for ship-ice interaction test at a scale ratio of 1:30.

\*通讯作者。

## Keywords

Model Experiment, Similarity Criterion, Artificial Model Ice, Test Technology

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

冰是自然界一种常见的物质, 因其存在的广泛性, 船舶与结构物在秋冬季节会不断与冰相互作用。随着南北极自然资源和能源的勘探两极冰盖变化加剧, 人类在两极的活动更加频繁[1]。虽然冰在自然界中很常见, 但人类对冰的认知却相当匮乏, 这也限制了冰-船舶、冰-结构物和冰-波浪等方面的研究。

模型冰是对天然冰的模拟, 主要用于结构物实验[2]和流体实验[3], 按其制作方式可分为冻结模型冰[4]和非冻结模型冰[5]。冻结模型冰, 通常是在水中添加化学成分在确保模型冰与天然冰密度、摩擦系数相同的前提下, 弱化模型冰的弹性模量、弯曲强度、压缩强度等材料的断裂力学性能; 而非冻结模型冰材料, 按其破坏性质可分为可破碎模型冰和不可破碎模型冰两种。不可破碎非冻结模型冰, 一般使用单一材料(石蜡、聚乙烯、聚丙烯等), 其力学性质中密度和摩擦系数与天然冰接近, 保证了相同的浮力和摩擦力相等, 但其不可破碎的性质限制了对断裂状态的模拟。可破碎非冻结模型冰由多种材料复合而成, 在满足密度、摩擦系数相等的前提下还满足断裂力等相似, 拟补了不可破碎模型冰无法模拟裂纹扩展的缺点, 使模型冰有更好的力学性能。因此, 设计出一种满足相似率的可破碎非冻结模型冰, 对于提高船舶与海洋结构物试验具有现实的指导含义。

## 2. 实验原理

可破碎非冻结模型冰实验是一种材料和流体实验, 是对自然界中天然冰断裂情况的模拟。因此非冻结模型冰, 应准确反映天然冰与结构相互作用时的物理信息。在进行实验前对模型率进行分析, 该材料能模拟结构的外形, 然后进行同比例的缩尺即满足几何相似。几何上的相似是容易实现的, 除此之外还应满足运动、动力和热相似, 前两个需要同时满足才能保证力学性能相似, 在研究中一般是以某一温度下冰的特性, 在该范围内冰的性质相对稳定, 因此热力学相似则很少考虑。

模型冰实验中动力占主导地位[6], 傅汝德数  $Fr$ 、雷诺数  $Re$  和柯西数  $Ca$  是普遍应用的相似准则, 上述准则按照力的重要性分别假定重力和惯性力、惯性力与粘性力、弹性力和惯性力相似; 冰数  $In$  是总结冰材料断裂韧性的断裂力与惯性力相似。在冰力学试验中, 由于试验对象不同, 各种力所占的成分也不相同, 例如船-冰相互作用试验中, 船舶受到的弹性力、重力和惯性力占据主导地位, 因此应尽可能满足柯西数、傅汝德数相等[7], 根据以上分析推导出的模型率如下表 1 所示。

**Table 1.** Summary of scaling laws according to Froude and Cauchy scaling (Timco, 1984)

**表 1.** 根据傅汝德数和柯西数推导的模型率总结(Timco, 1984)

| 变量     | 缩尺比                                   | 天然冰况参考       |
|--------|---------------------------------------|--------------|
| 冰厚     | $[h]_p = \lambda [h]_m$               | 5~5000 mm    |
| 冰的压缩强度 | $[\sigma_c]_p = \lambda [\sigma_c]_m$ | 800~1200 kPa |

## Continued

|           |   |                       |
|-----------|---|-----------------------|
| 冰的弯曲强度    | $[\sigma_f]_p = \lambda [\sigma_f]_M$   | 700~800 kPa           |
| 冰的剪切强度    | $[\sigma_s]_p = \lambda [\sigma_s]_M$   | 1500~2100 kPa         |
| 冰的弹性模量    | $[E]_p = \lambda [E]_M$                 | 2500~4500 kPa         |
| 速度        | $[V]_p = \lambda^{1/2} [V]_M$           | -                     |
| 时间        | $[T]_p = \lambda^{1/2} [T]_M$           | -                     |
| 力         | $[F]_p = \lambda^3 [F]_M$               | -                     |
| 质量        | $[M]_p = \lambda^3 [M]_M$               | -                     |
| 冰临界应力强度因子 | $[K_{ic}]_p = \lambda^{3/2} [K_{ic}]_M$ | 100 kPa               |
| 加速度       | $[a]_p = [a]_M$                         | -                     |
| 弹性模量比弯曲强度 | $[E/\sigma_f]_p = [E/\sigma_f]_M$       | 2500~4500             |
| 冰摩擦系数     | $[f]_p = [f]_M$                         | 0.45~0.5              |
| 冰密度       | $[\rho]_p = [\rho]_M$                   | 910 kg/m <sup>3</sup> |
| 泊松比       | $[v]_p = \lambda [v]_M$                 | 0.3                   |

在进行模型冰的力学性质测量时依据国际拖曳水池会议(ITTC2002)推荐的测试程序, 主要测量模型冰的压缩强度及弯曲强度。在进行压缩强度试验时, 为方便加工及现场测试试件一般时边长  $h$  的正方体, 其中  $h$  是冰的厚度, 试验以恒定速度进行, 如 30, 10, 3, 1 mm/s, 抗压强度可以用下式计算:

$$\sigma_c = \frac{F}{ci * mkbh} \quad (1)$$

式中  $F$  为测量力,  $m$  为形状因素(圆形为 0.9),  $k$  为接触因子(0.4~0.7),  $h$  冰厚度,  $b$  压头直径,  $ci$  常数, 在冰水池中进行试验时需要记录的量有压头尺寸、测量的冰厚度、试验的位置、测量的时间、速度、测量负载、计算的抗压强度。

弯曲强度试件尺寸为:  $L = (5\sim7) * h$ ,  $B = (2\sim3) * h$ , 测试方法有悬臂梁和三点弯曲测试, 每次以相同的方式切割, 加载速度约为 1mm/s, 三点弯曲测试的计算式为:

$$\sigma_f = \frac{F}{W} = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (2)$$

式中  $F$  为加载力(测量的),  $L$  为到加载点的距离,  $b$  为梁的宽度,  $h$  为冰的厚度, 最后需要记录的量有梁的主尺度  $L$ 、 $b$ 、 $h$ 、破坏载荷  $F$ 、载荷 - 挠度随时间的变化曲线。

### 3. 实验设计

#### 3.1. 实验材料与仪器

试验中用于制备非冻结模型冰的材料有 1801 硬脂酸、2426 h 聚乙烯颗粒和沸水; 试验仪器有用于压缩试验的 Zwick 电子万能试验机和用于弯曲试验的 CTM-100GD 试验机。

### 3.2. 试样制备

由于硬脂酸的熔点为  $56^{\circ}\text{C}\sim 69.6^{\circ}\text{C}$ ，在沸水中硬脂酸颗粒会融化成油状；而聚乙烯颗粒熔点约为高于沸水温度  $130^{\circ}\text{C}$ ，以原装保持在油状硬脂酸和沸水混合溶液中。同时硬脂酸密度和聚乙烯密度非常接近，硬脂酸夹杂聚乙烯颗粒的混合后缓慢凝固形成非冻结模型冰。

图 1 中(a)、(b)为融化状态、凝固状态的模型冰；(c)、(d)分别为非冻结模型冰内部结构和冰水池中粒状模型冰内部结构。由(c)、(d)可以看出，制作完成的可破碎非冻结模型冰与冰水池中的冻结模型冰具有相同的粒状晶格[8]，并且模拟出顶部硬化层、中部过渡层的底部松软层的典型分层过渡结构，从而保证了加载时破坏方式的一致性。

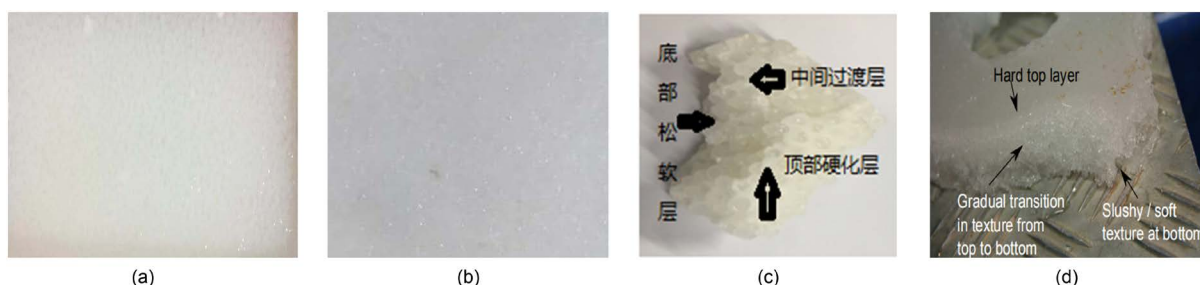


Figure 1. Preparation of crushed artificial model ice specimens

图 1. 可破碎非冻结模型冰试件制备

为探究试件中聚乙烯颗粒所占比例与非冻结模型冰强度之间的关系，将聚乙烯颗粒按 0、0.1、0.2、0.3、0.4 的比例与硬脂酸混合制作非冻结模型冰试件。

### 3.3. 试件强度测定

模型冰应与真实海冰具有相似的力学性能，由第一部分试验原理选择弯曲强度和压缩强度作为非冻结模型冰的主要力学性能进行测定，依据世界拖曳水池会议(ITTC2002)推荐的测试程序进行。这里选择模型冰与原海冰的缩尺比为 1:30，模拟原海冰厚度 1500 mm，则对应的模型尺寸为： $h = 50\text{ mm}$ ； $L = 265\text{ mm}$ ； $B = 100\text{ mm}$ 。天然冰强度受加载速率较大，当应变率小于  $10^{-7}/\text{s}$  时通常表现为韧性破坏，高于  $10^{-3}/\text{s}$  时表现为脆性破坏，而应变速率介于  $10^{-7}\sim 10^{-3}/\text{s}$  之间时表现为韧性向脆性转换的过程。船-冰相互作用过程中船速一般在 1~3 kn 左右，换算到模型尺度的速度为 0.09~0.28 m/s，实船舶柱倾角一般在  $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ，因此选择 10 mm/s 的加载速率用于试验时的加载。

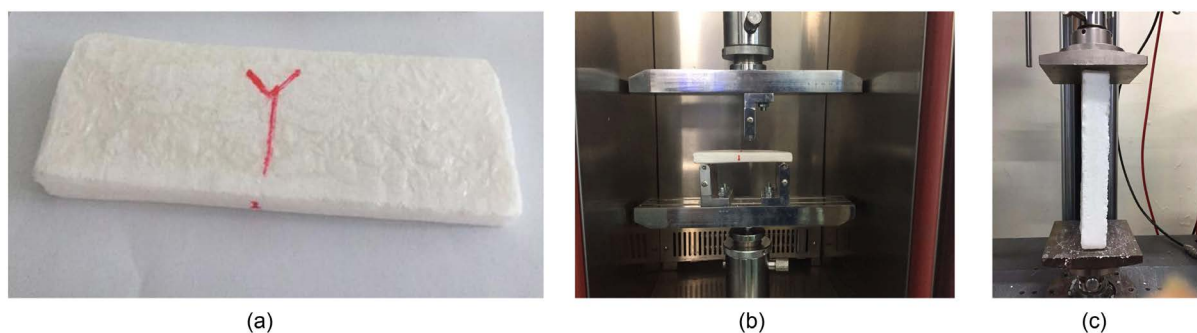


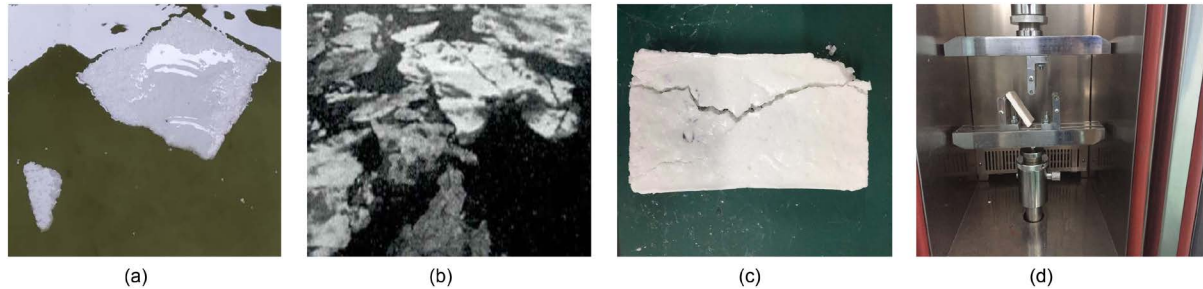
Figure 2. Mechanical properties test of artificial model ice, model ice Specimen (a), three-point bending test (b), uniaxial compression test (c)

图 2. 非冻结模型冰力学性能试验，(a) 模型冰试件、(b) 三点弯曲试验、(c) 单轴压缩试验

图2是非冻结模型冰试验时的图片,图2(a)为按照试验尺寸加工好的试件,图2(b)为试件在CTM-100GD试验机上进行弯曲强度测试,图2(c)为试件在Zwick电子万能试验机进行单轴压缩强度测试。

### 3.4. 试验结果

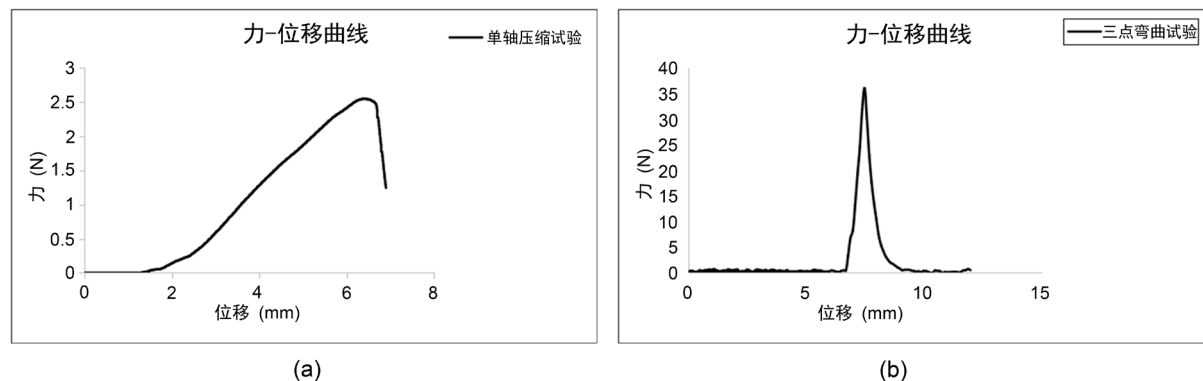
从下图3中,(a)、(b)可以看出非冻结模型冰与天然海冰具有相同的漂浮状态[9];从(c)单轴压缩试件破坏裂纹情况可以看出,非冻结模型冰与天然冰在单轴压缩情况下有相同的裂纹扩张方向和裂纹宽度[10];从(d)展示的非冻结模型冰的弯曲破坏可以观察到与海冰相同的断裂形式[11]。



**Figure 3.** Results of non-frozen model ice, comparison of natural sea ice floating state (a), (b), uniaxial compression test (c), three-point bending test (d)

**图3.** 非冻结模型冰结果,模型比天然海冰浮态对比(a)、(b)、单轴压缩试验结果(c)、三点弯曲试验结果(d)

图4给出的图4(a)是40%聚乙烯颗粒时单轴压缩试验结果,非冻结模型冰在10 mm/s压载速率的情况下峰值载荷为25.3 N,对应的压缩强度为56.5 kPa;图4(b)给出的是在相同压载速率下,弯曲试验的结果,对应的弯曲强度为36 kPa。



**Figure 4.** Uniaxial compression test and three point bending test results, force-displacement curves

**图4.** 单轴压缩试验和三点弯曲试验结果,力-位移曲线图

## 4. 分析与讨论

### 4.1. 不同比例对材料的影响

按照3.2中材料准备及3.3强度试验所述,对聚乙烯颗粒占不同比例的非冻结模型冰,进行弯曲强度和压缩试验,结果如图5所示。

由图5不同材料配比的非冻结模型冰强度可知,纯硬脂酸强度最高为300 kpa。随着模型冰中聚乙烯颗粒所占比例由0增加到0.4,该材料的弯曲强度和压缩强度随之逐渐降低,二者呈负相关。由实验原理中表1可知,理想的海冰弯曲强度和压缩强度值分别为700~800 kpa和800~1200 kpa,在缩尺比为1:30

时目标强度为 25 kpa 和 40 kpa，因此，纯硬脂酸并不适用于缩尺比 1:30 的模型试验。随着模型冰材料中聚乙烯颗粒占比增加，模型冰弯曲强度和弯曲强度随之逐渐降低。当聚乙烯颗粒在模型冰中占比达到 0.4 时，根据相似准则可以判断，该非冻结模型冰的强度吻合的较好。

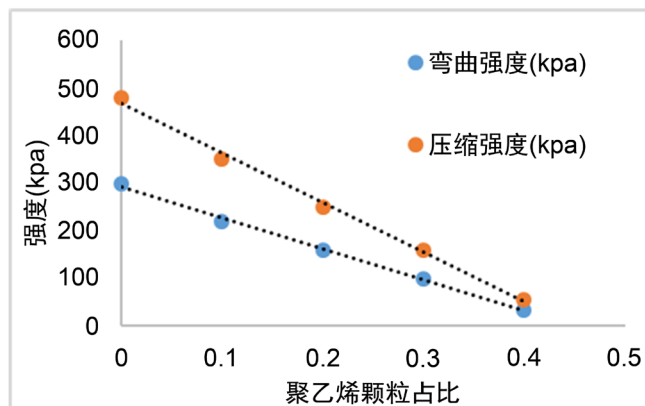


Figure 5. Curve: different ice strength curves of the model with different ratio

图 5. 不同此配比模型冰强度结果曲线

## 4.2. 模型冰的力学特征分析

由第一部分试验原理可知，非冻结模型冰与原海冰的不同参数对应不同的缩尺比，在分析所受到主要作用力情况后根据傅汝德准则和柯西准则进行。虽然目前已有众多模型冰，但每一种模型冰都不能同时保证满足以上所有需求，而是根据试验需求有所侧重。进行船冰相互作用试验时重点关注弯曲破坏[12] [13]，因为船首的倾斜结构导致冰主要以弯曲的形式破坏；而在进行结构物与冰相互作用试验时，更加关注压缩导致的破坏，因为结构物的倾斜程度较低，冰在这种情形下多是压缩或者剪切破坏。

模型冰密度关系着漂浮状态和所受浮力，由漂浮状态实验可得出该模型冰能很好的模拟实验中的浮力。天然海冰的微观结构并不是均质的，中间不规则的分布着气穴、杂质和卤水泡等，这种结构上的特点使裂纹在产生时也是随机的。由强度实验结论可知，单纯的硬脂酸强度最高，而随着聚乙烯颗粒的不断加入，模型冰的强度随之降低，这与天然海冰的表现是相同的。

## 5. 总结

随着极地科考的逐渐深入，对破冰船破冰方式、破冰能力等的研究也不断增强，本文在提供了一种适用于常规水池的非冻结可破碎模型冰，经过试验研究表明主要力学性质满足规定缩尺比下船-冰的试验需求。通过总结船-冰相互作用时主要受力分析，得出适用于非冻结模型冰实验的模型率。根据以上推导出的缩尺关系，以硬脂酸材料为基本材料，聚乙烯颗粒为掺入材料进行试验研究。依据国际拖曳水池 ITTC 推荐的试验步骤准备试验中的模型冰试件，研究结果显示该非冻结模型冰密度、压缩强度和弯曲强度满足船-冰模型试验需求。

## 致 谢

本研究是在中国工信部极地专项课题一(极地海冰力学特性与冰水池试验技术研究)项目的支持下开展的。本研究也得到了哈尔滨工程大学的支持，实验使用了哈尔滨工程大学的拖曳池和相关实验室。实验室工作人员协助确保了试验研究的成功。作者对那些支持这项研究的人表示衷心的感谢。

## 基金项目

国家自然科学基金(51909043)、(51679052), 工信部高技术船舶科研项目(2017-614), 黑龙江省科学基金项目(F2018026)。

## 参考文献

- [1] 李振福, 孙悦, 韦博文. “冰上丝绸之路”——北极航线船舶航行安全的跟驰模型[J]. 大连海事大学学报, 2018, 44(3): 22-27.
- [2] 王梦颖, 穆顷, 张晓频, 张霖, 李明. 渤海固定结构物冰力特点及计算方法[J]. 船海工程, 2016, 45(5): 135-138.
- [3] 王超, 叶礼裕, 常欣, 李兴. 非接触工况下冰桨干扰水动力载荷试验[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(8): 1190-1196.
- [4] 黄焱, 马高强, 孙剑桥. 船-冰碰撞载荷时间历程的模型试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(4): 7-14.
- [5] 郭春雨, 徐佩, 张海鹏. 冰对螺旋桨水动力性能影响的试验研究[J]. 船海力学, 2018, 22(7): 797-806.
- [6] 康瑞. 平整冰中破冰船操纵性能预报[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [7] Huang, Y., Huang, S.Y., *et al.* (2018) Experiments on Navigating Resistance of an Icebreaker in Snow Covered Level Ice. *Cold Regions Science and Technology*, **152**, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.04.007>
- [8] 王庆凯. 北极航道融冰期海冰物理和力学工程参数研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [9] Kim, H. and Colbourne, B. (2016) A Study of the Effect of Contact Surface Geometry and Crushing Rate on the Behavior of the Ice. *Ocean Engineering*, **126**, 240-253. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.09.025>
- [10] Jeong, S.-Y., *et al.* (2017) Implementation of Ship Performance Test in Brash Ice Channel. *Ocean Engineering*, **140**, 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.05.008>
- [11] Luo, W.-Z., Guo, C.-Y., *et al.* (2018) Experimental Research on Resistance and Motion Attitude Variation of Ship-Wave-Ice Interaction in Marginal Ice Zones. *Marine Structures*, **58**, 399-415. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2017.12.013>
- [12] Kvadsheim, S. (2014) Ice Ridge Keel Size Distributions: Analysis of Ice Ridge Keel Thickness from Upward Looking Sonar Data from the Fram Strait Using Extreme Value Theory. NTNU.
- [13] Zhang, J., *et al.* (2019) A Stochastic Method for the Prediction of Icebreaker Bow Extreme Stresses. *Applied Ocean Research*, **87**, 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.03.019>