文章编号：1007−7294(2026)07−1041−13

北极融冰期海冰典型力学特性测试分析

王琛鑫，余朝歌，赵伟航，刚旭皓，田于逵
（中国船舶科学研究中心，江苏 无锡 214082）

摘要：北极融冰期海冰力学特性的准确获取，是北极航道通航安全评估、船舶破冰阻力预报和极地工程结构抗冰设计的重要基础。本文基于实验室试验、现场试验与冰晶图像识别结果，开展了单轴压缩、三点弯曲、温盐密测试及微观结构观测分析。结果显示：实验室条件下，海冰单轴压缩强度随应变速率变化呈现明显的韧−脆转化特征，在 4.8×10^{-4} s^{-1} 附近达到峰值 2.41 MPa；现场三点弯曲强度沿厚度方向表现出显著分层特征，中部柱状冰强度相对较高，下层冰受海水融蚀及结构完整性降低影响，弯曲强度明显下降。实验室与现场试验结果存在差异，该差异与温度条件差异相一致；在本文试验条件下，低温实验室环境（−10 ℃）下获得的冰样强度整体较高。冰晶与孔隙观测结果显示，融冰期海冰内部存在明显的层状微结构差异，可为理解力学性能离散性、裂纹萌生路径和结构弱化机制提供微观依据。本文研究可为北极融冰期海冰力学参数选取及实验室−现场试验结果互校提供参考。

关键词：北极融冰期海冰；晶体结构；物理性质；力学性质
中图分类号：P731.15 **文献标识码：**A **doi:** 10.3969/j.issn.1007−7294.2026.07.001

Testing and analysis of typical mechanical properties of sea ice during the Arctic melting period

WANG Chen−xin, *YU Chao−ge*, *ZHAO Wei−hang*, *GANG Xu−hao*, *TIAN Yu−kui*
(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract: Accurate determination of the mechanical properties of Arctic sea ice during the melting season is essential for navigation safety assessment in Arctic routes, prediction of ship icebreaking resistance, and ice-load design of polar engineering structures. In this study, uniaxial compression, three-point bending, temperature-salinity-density testing, and microstructural observations were conducted based on laboratory experiments, field trials, and ice-crystal image analysis. The results indicate that, under laboratory conditions, the uniaxial compressive strength of sea ice exhibits a pronounced ductile-to-brittle transition with varying strain rates, and reaches a peak value of 2.41 MPa at approximately 4.8×10^{-4} s^{-1}. The field results of three-point bending tests revealed a marked layered strength profile along the ice thickness; the central columnar ice exhibited relatively higher strength, whereas the lower layer showed significantly reduced bending strength due to seawater melting and compromised structural integrity. Differences between laboratory and field test results are consistent with the difference in temperature conditions; under the test conditions of this

收稿日期：2025−12−09
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52192694；52192690）；高技术船舶科研项目（[2021]342 号）
作者简介：王琛鑫（2002–），男，硕士研究生，E-mail：wangchenxin@ustc.edu；
田于逵（1968–），男，研究员，通讯作者，E-mail：tianyukui@cssrc.com.cn。

study, ice strength obtained in the low-temperature laboratory environment (−10 ℃) was generally higher than that of field tests. Observations of ice crystals and pores indicated distinct layered microstructural variations within melting-season sea ice, offering microstructural evidence for interpreting the variability of mechanical properties, crack initiation paths, and mechanisms of structural weakening. This study may provide a reference for the selection of mechanical parameters of Arctic sea ice during the melting season and for the cross-validation of laboratory and field test results.

Key words: Arctic sea ice during melting period; crystal structure; physical properties; mechanical properties

0 引　言

北极地区是地球气候系统的"放大器",其近地表气温升幅在近几十年达到全球平均水平的 2 至 4 倍。伴随这一剧烈变暖过程,北极海冰呈现加速消融态势,近年来趋于以一年冰为主,多年冰趋于消失[1]。而海冰作为一种由纯冰、卤水胞、气泡、盐类夹杂物等组成的多相复合晶体材料,其力学性质会受到冰晶结构、温度、盐度、密度等物理性质的影响[2]。

冰的力学性质是研究冰区航行船破冰阻力的重要依据[3],同时也是极地探索和极地工程建设的重要参数,例如破冰船的破冰过程可以视为对冰层的挤压和弯曲破坏,直立式结构物可以使海冰发生挤压破坏,倾斜式或锥体结构物可以使海冰发生弯曲破坏,这些破坏形式所产生的冰载荷是工程实际中海冰力学性质的直接体现[4]。

单轴压缩试验用于测定冰样本在单一轴向压力作用下的力学性能,包括抗压强度及破坏模式。张丽敏[5] 分析了海冰的压缩强度与应变速率的关系,压缩速率较大时海冰表现出较低的压缩强度,在韧脆转化区海冰的压缩强度达到最高,随后在韧性区则与应变速率呈正相关。Wang 等[6] 对南极东部普里兹湾海冰的抗压强度进行了实验室分析。李志军等[7] 对渤海海冰开展了单轴压缩试验,研究了孔隙率、温度、应变率对单轴压缩强度的影响。刘禹博等[8] 研究了渤海粒状海冰平行冰面方向的单轴压缩强度,得到宽应变速率区间粒状海冰单轴压缩强度随应变速率和孔隙率变化的统计关系曲面,并将这一结果与北极融冰期粒状海冰进行比较分析,讨论了渤海海冰与极地海冰力学性质统一数学描述的可行性。此外,还有对单轴压缩下冰样温度、韧脆转化及破坏模式对压缩强度影响的研究[9−10]。

海冰的弯曲试验用于测定海冰的弯曲强度,赵伟航等[11] 通过对模型冰进行圆盘中心加载,分析冰样承载失效过程。在此基础上,改变加载速度和冰样温度,开展系列试验测量,分析两个因素对模型冰弯曲强度的影响。为确定海冰温度、卤水体积等因素对海冰弯曲强度的影响,孟丁丁等[12] 对辽东湾东岸海域的平整冰进行了现场取样,进行了三点弯曲试验,分析了海冰弯曲强度的温度敏感性以及裂纹的发展过程,还讨论了海冰弯曲强度与卤水体积的对应关系。

综上所述,海冰力学性质研究的主要是对于压缩和弯曲强度的分析,其中现场试验被认为更加符合工程实际,实验室试验环境可控且更易操作。本文以北极融冰期海冰为对象,结合实验室力学试验、现场力学试验和冰晶图像识别结果,分析其宏观力学特性、环境敏感性和层状异质性。本文数据由三部分组成:一是实验室单轴压缩和三点弯曲试验获取力学强度与破坏模式;二是现场温盐密剖面及现场力学试验,用于反映融冰期原位环境下海冰力学性质;三是冰晶与孔隙图像识别结果,用于表征海冰微观结构分层特征。需要说明的是,由于本文力学试验的样本和冰晶观测样本并非来自同一采样点,本文不建立“孔隙尺寸−力学强度”的逐层定量关系,而采用“宏观力学结果−物理性质解释−微观机制支撑”的分析路径。

1 实验室试验

1.1 冰样本处理与试验工况

实验室试验所用到的冰样本系从北极(80°12.3′N, 167°56.3′E)(见图 1 所示), 被封装于专用保温箱中, 全程核心温控区间维持在−5 ℃ 至−15 ℃, 随船运送至国内后, 通过冷链车(−5 ℃)运输到中国船舶科学研究中心(CSSRC)小型冰水池, 存储在−18 ℃ 的冰柜内。实验室试验在 CSSRC 的低温实验室进行, 尺寸为 3 m(长)×2.2 m(宽)×2.8 m(深), 主要用于模型冰力学性能测试, 其空气温度可控制在−15 ℃ ~ 5 ℃ 范围内[13]。在试验前将冰样本放置于低温实验室预冷(−10 ℃) 10 小时, 使冰样本与实验室温度达到热平衡。

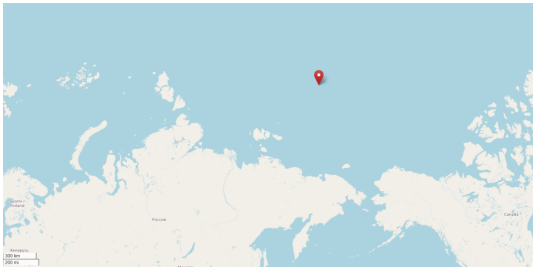


图 1 海冰样本取样点

Fig.1 Sea ice sample collection site

实验室试验工况如表 1 所示。

表 1 试验类型及工况表

Tab.1 Table of test types and working conditions

试验类型	样本数量	试验设备（方法）	样本尺寸/长×宽×高（mm）	加载速率 /（$mm \cdot min^{-1}$）
单轴压缩	14	材料试验机	70×70×175	0.1~500
三点弯曲	3	材料试验机	300×80×40	200
冰晶观测	8	偏振光成像/Cellpose图像识别	约1 mm厚度薄片	—

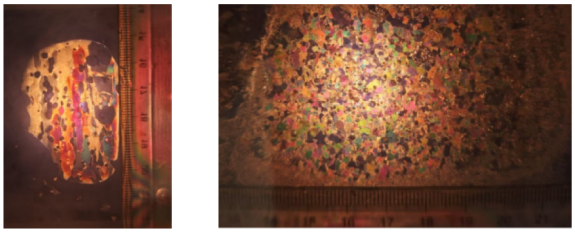
1.2 冰晶观测试验

海冰是一种由纯冰晶体、卤水胞、气泡、晶界及盐类夹杂物等共同组成的多相复合材料, 其晶体形态、晶粒尺寸、晶界连通性和孔隙结构会影响裂纹萌生、扩展路径和宏观破坏模式。尤其在融冰期, 太阳辐射、大气升温、卤水下泄和海水底部融蚀共同作用[14], 使海冰内部产生明显的层状非均质性。因此, 微观结构观测对于理解海冰强度离散性和局部弱化机制具有重要意义。

本文采用偏振光成像与图像识别方法对冰晶结构进行观测。图 2 给出了海冰切片在偏振光下的垂直和水平晶体结构, 水平切片可用于统计晶体粒径。晶粒尺寸采用薄片中完整晶粒平均面积对应的等效圆直径表示, 其计算公式如下

$$D_g = 2\sqrt{s/(n\pi)} \tag{1}$$

式中: D_g 为冰晶体晶粒的平均等效直径, 单位为 mm; S 为薄冰片上完整晶粒的总面积, 单位为 mm^2; n 为薄冰片上完整晶粒的个数。通过拍照和图片分析, 可获得图 2(b)的冰粒径尺寸约为 2 mm。

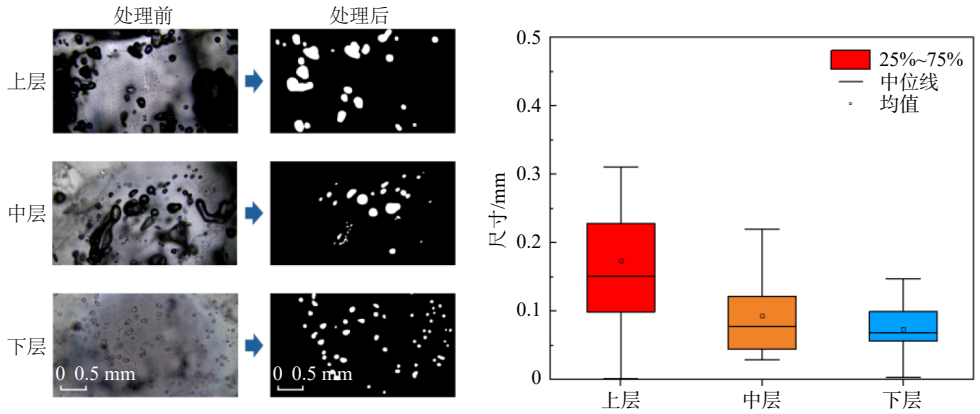


（a）北极冰偏振光下垂直剖面切片　　（b）北极冰偏振光下水平剖面切片

图 2 冰晶观测样本

Fig.2 Ice crystal observation samples

本文在冰芯柱每隔约 20 cm 取样, 对于气泡和卤水胞等孔隙结构, 利用不同深度处冰切片图像进行识别与统计, 并采用 Cellpose 软件辅助分割。图 3(a)为部分海冰在不同深度处水平方向切片处理前后的图像。结果显示, 海冰孔隙结构随深度呈现明显差异: 上层孔隙相对较大、数量较少, 说明其孔隙结构较为稀疏且尺寸偏大; 中层孔隙数量和尺度处于过渡状态; 下层孔隙尺寸较小但数量较多, 表现出较高的孔隙密集程度。图 3(b)进一步表明, 孔隙尺寸中值和平均值整体随深度增加而减小, 且分布区间逐渐向小尺寸范围收敛。

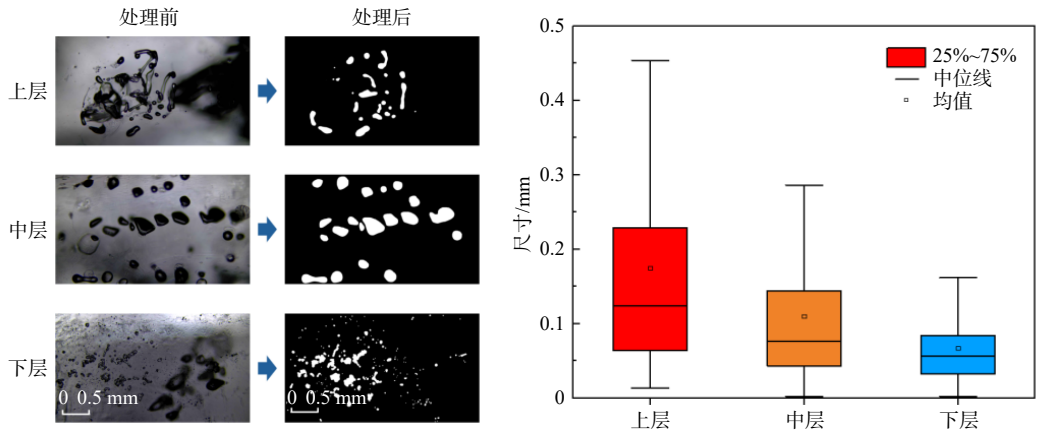


（a）不同深度处海冰微结构水平方向处理前后图像　（b）不同深度处海冰水平方向孔隙尺寸分布

图 3 海冰微结构水平方向统计结果

Fig.3 Statistical results of sea ice microstructure in the horizontal direction

图 4(a)展示了不同深度处垂直方向切片处理前后的图像。上层垂直切片中的孔隙多呈长条状并具有一定定向延伸特征，孔隙之间间距较大；中层孔隙形态介于上层与下层之间，局部可见连通趋势；下层孔隙尺寸普遍较小但数量较多，呈现短径化和高密度分布。图 4(b)的统计结果显示，垂直方向孔隙长轴尺寸的中值和平均值随深度增加整体减小，与水平方向观测结果具有一致性。上述现象反映出融冰期海冰在厚度方向上并非均质材料，而是具有显著的结构分层特征。



（a）不同深度处海冰微结构垂直方向处理前后图像　（b）不同深度处海冰垂直方向孔隙尺寸分布

图 4 海冰微结构垂直方向统计结果

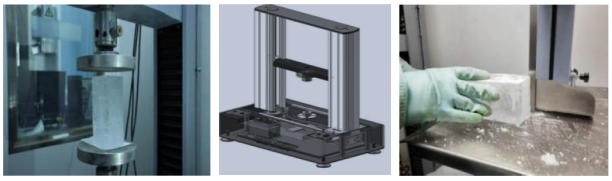
Fig.4 Statistical results of sea ice microstructure in the vertical direction

从力学意义上看，孔隙和晶界可作为局部应力集中区，并可能成为裂纹萌生和扩展的优先路径。上层较大孔隙可能增强渗透性并改变局部承载面积，下层密集小孔隙和融蚀缺陷则可能削弱冰体结构完整性；中层过渡结构可能使强度表现出较高离散性。需要强调的是，本文微观结构观测用于解释融冰期海冰力学行为的可能机制和离散性来源，而非对力学试验强度作直接定量归因。

1.3 单轴压缩试验

在工程应用中，无论是破冰船还是直立式柱状结构物，都更重视海冰沿垂直于生长方向加载的压缩强度，因此本文的单轴压缩试验试样均为垂直生长方向加载。以“雪龙”号为例，与冰相互作用过程中冰层的应变速率最大约为 1.7×10^{-2} s^{-1}[15]，此外，根据冰与直立柱状结构物作用时的应变速率[16]，本次试验设计应变速率为 9.5×10^{-6}~4.8×10^{-2} s^{-1}，根据加载速率，从 0.1~500 mm/min 分为五组试样，用锯骨刀将冰坯加工成 7 cm×7 cm×17.5 cm 的样本，冰样本处理如图 5 所示。对于冰样本密度的测量，本文采用

的排水体积法可以快速测得不规则形状冰样本的密度，因此密度测量可以选择冰样本加工过程中产生的边角料。冰样本的盐度测量是将单轴压缩试验后已经破坏的样本装进干净的冰样本盒内，放置于室温下待其自然融化后用精度为±0.001‰的盐度计测量，取所有冰样本盐度的平均值作为冰样本的平均盐度。从北极运输冰样本成本较高，这种测量密度和盐度的方法可以很大程度上减少冰样本的损耗。而在低温实验室放置 10 小时的冰样本达到热力平衡后，冰温基本等于实验室的气温，也就是−10 ℃。



（a）材料试验机压缩冰样　（b）材料试验机　（c）锯骨机切割冰样

图 5 单轴压缩试验的冰样本处理

Fig.5 Ice sample preparation for uniaxial compression tests

压缩试验用材料试验机在低温实验室对冰样本进行压缩，力和位移传感器记录下压过程中压盘所受的力和移动距离并实时绘制其力−位移曲线显示在实验室外侧的电脑上。

计算海冰的单轴压缩强度可由试验中的最大加载力确定，即

$$\sigma_{\mathrm{c}}=\frac{F_{\max}}{A_i} \tag{2}$$

式中：σ_{c}为冰的单轴压缩强度，$F_{\max}$为极限破坏载荷，A_i为试样的截面积。

应变量的计算则需要考虑海冰的工程应变和真实应变的选择，一般来说，工程应变适用于应变量小的破坏形式，真实应变适合应变量较大的场景，本文海冰破坏时应变量均小于 5%，因此采用工程应变的计算方法

$$\varepsilon=\frac{\Delta L}{L_{\mathrm{i}}} \tag{3}$$

式中：ε为海冰的应变量，ΔL为海冰破坏时高度的变化量，L_{i} 为海冰试样初始高度。

试样在加载过程中的应变速率为

$$\varepsilon_c=\frac{v}{L_i} \tag{4}$$

式中：ε_{c}为海冰应变速率，v 为加载速率，L_{i} 为海冰试样初始高度。

1.4 三点弯曲试验

弯曲破坏也是海冰破坏的主要形式之一，如破冰船下压以及冰和锥体结构物的作用都是典型的弯曲破坏，而弯曲破坏的强度要远低于挤压破坏的强度[16]，因此冰弯曲破坏的低荷载优势在船舶破冰和结构物抗冰设计中得到了广泛应用，而海冰在锥体或斜面的弯曲破坏均沿海冰的生长方向进行，因此本文弯曲试验的冰样本加载均沿海冰的生长方向。对于加载速率的选择，修苑人等[17] 于 2023 年在辽东湾对粒状海冰的弯曲强度进行研究，共测试了 42 个沿生长方向加载的海冰试样，应变速率为 1×10^{-6}~6×10^{-4}/s，归一化后发现弯曲强度没有速率依赖性，而目前的研究也都不足以证明海冰的弯曲破坏对加载速率的敏感性，本文选取的应变速率约为 8×10^{-4}/s，采用 20 mm/min 的加载速率进行海冰的三点弯曲实验，加载方向均沿冰样的生长方向，使用锯骨机将冰样加工成尺寸为 30 cm×8 cm×4 cm 的试样。

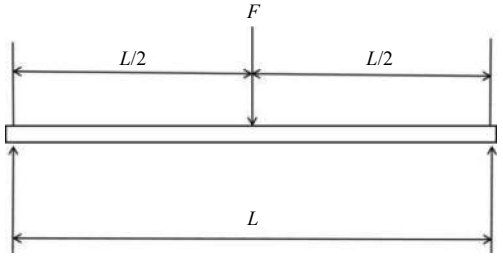


图 6 三点弯曲实验加载示意图

Fig.6 Schematic diagram of the loading configurations of three-point bending test

三点弯曲试验是实验室冰力学测试中常用的弯曲实验方法之一，因其试验设计简单，样本尺寸较小的特点，常用于评估冰样本的抗弯强度、弹性模量、断裂韧性等性能。加载方式如图 6 所示，由两个支撑点支撑，在中间位置施加弯曲力。弯曲试验同样采用材料试验机在低温

实验室内进行，在加载过程中采集冰样破坏过程中的冰样的位移、力的实时曲线可计算弯曲应变和弯曲强度，三点弯曲的弯曲强度为

$$\sigma_f = \frac{3LF_{\max}}{2bh^2} \tag{5}$$

式中：L 为支撑点间距，h 为冰样厚度，b 为冰样宽度，$F_{\max}$ 为弯曲破坏载荷。

三点弯曲的弹性模量为

$$E = \frac{F_{\max}L^3}{4bh^3\delta} \tag{6}$$

式中：L 为支撑点间距，h 为冰样厚度，b 为冰样宽度，$F_{\max}$ 为弯曲破坏载荷，δ 为挠度。

2 实验室力学试验结果分析

2.1 实验室海冰样本的物理性质

海冰的物理性质主要包括温度、盐度和密度，冰样本的物理性质直接决定了其力学性质。实验室试验可以控制冰样本的温度，当与空气达到热平衡后，冰温基本等于低温实验室的气温，本文冰样本在低温实验室放置 10 小时后基本达到热平衡，经测量冰样本冰温基本为−10 ℃。密度在试验前通过排水体积法测得，盐度则采用单轴压缩和三点弯曲试验破坏后的冰样，以盐度计测得其盐度数值，因试验所切割的冰样均取自同一原始冰样，因此最终取平均值作为冰样本的平均密度和盐度。经测量，冰样本平均密度为 898 kg/m^3，平均盐度为 0.172 PPT，在明确冰样本的物理性质后，对其力学性质进行分析。

2.2 单轴压缩试验结果分析

海冰单轴压缩的试验数据需要转换成应力和应变的关系进行分析，材料试验机可以输出力−位移曲线，将原始数据进行处理后就可以得到冰样本的应力−应变曲线，每一单轴压缩试样均可得到一条应力−应变曲线，不同应变速率对应不同形式的曲线，将 5 种不同加载速率下冰样本的典型应力−应变曲线绘制于图 7 中，将图中应力−应变曲线与对应试验结束后的试样照片(图 8)结合进行讨论。

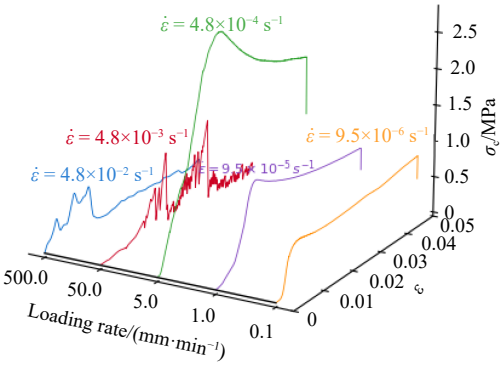


图 7 不同应变速率下冰样应力−应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of ice specimens under different loading rates

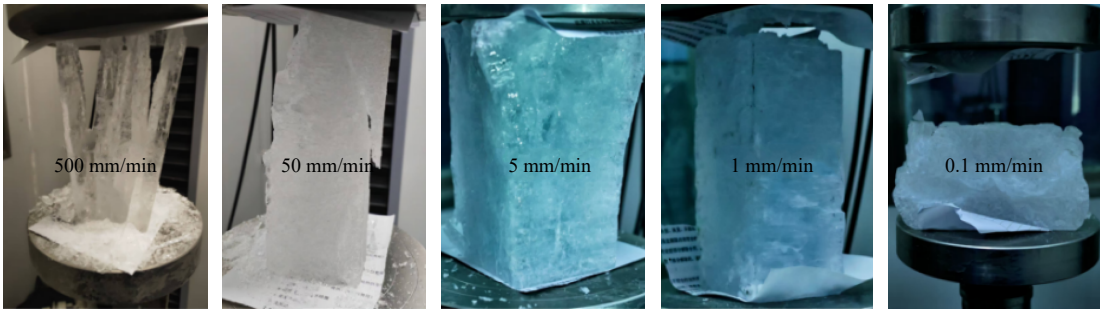


图 8 不同加载速率下冰样的破坏形式

Fig.8 Failure modes of ice specimens under different loading rates

海冰在单轴压缩试验中会受到挤压作用并发生破坏，在破坏过程中冰晶体之间相互产生位移，如果加载速率很快，冰晶体之间的位错滑移无法充分发展，海冰会优先在应力集中处产生裂纹并进一步发展成宏观裂纹，导致海冰发生碎裂或劈裂，应力−应变曲线也会呈断崖式下降，如图 7 中对应的 4.8×

10^{-2} s^{-1} 和 4.8×10^{-3} s^{-1} 应变速率下的应力−应变曲线和破坏形式，这就是典型的脆性破坏。反之如果加载速率较慢，海冰不会产生较大的宏观裂纹，试样表现出弹性特征，应力随应变线性增加，在弹性变形达到极限后应力进入屈服阶段，此时试样内部产生许多微小裂纹，屈服阶段结束之后应力下降，冰晶体间可以进行缓慢的滑移，这样得到的应力应变曲线就会较为平滑，这样的破坏则称为韧性破坏，如 4.8×10^{-4} s^{-1} 应变速率下的冰样本就是典型的韧性破坏形式。如果加载速率非常缓慢，冰晶体间的位错滑移得以充分发展，就会出现 9.5×10^{-6} s^{-1} 应变速率下冰样本的破坏形式，应力−应变曲线非常平缓，破坏后样本高度大幅变短，这种破坏形式称之为蠕变破坏，属于韧性破坏。而除了脆性破坏和韧性破坏，还有一种介于两者之间的特殊破坏形式，它的应力−应变曲线没有断崖式下降但也不平缓，这种破坏形式无法仅凭应力−应变曲线和破坏样本直判断，但由于其压缩强度同时大于脆性和韧性破坏，可通过压缩强度的大小进行推测，如 9.5×10^{-5} s^{-1} 应变速率下的冰样本就属于这种介于脆性和韧性之间的破坏形式，本文称之为韧−脆转化。

根据试验结果来看，应变速率为 4.8×10^{-2} s^{-1} 的冰样本破坏形式为脆性破坏，平均压缩强度σ_c为 1.01 MPa，应变速率为 4.8×10^{-3} s^{-1} 加载速率加载的冰样本依然以脆性破坏为主，平均破坏载荷为 0.97 MPa。应变速率为 4.8×10^{-4} s^{-1} 的冰样本压缩强度显著大于其它应变速率的冰样本，符合韧−脆转化压缩强度最大的特点，平均压缩强度为 2.41 MPa。应变速率 9.5×10^{-5} s^{-1} 的冰样本的破坏形式为韧性破坏，平均压缩强度为 1.11 MPa。以 0.1 mm/min 加载速率加载的冰样本完全蠕变，当应变为 1.37% 时冰样本发生了破坏，取此时的载荷为试样的破坏载荷，此时破坏载荷为 0.646 MPa。

实验室试验结果汇总如表 2 所示。

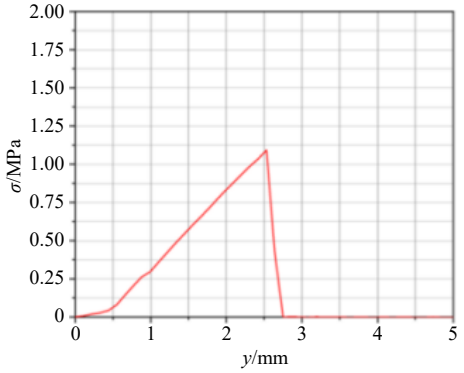
表 2　实验室单轴压缩试验结果

Tab.2　Test results of laboratory uniaxial compression

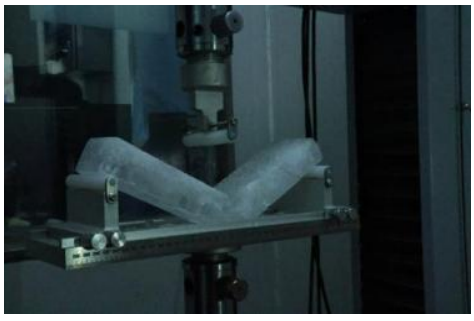
加载速率 /（mm·min^{-1}）	应变速率 /s^{-1}	平均压缩强度 /MPa	破坏形式
500	4.8×10^{-2}	1.01	脆性
50	4.8×10^{-3}	0.97	脆性
5	4.8×10^{-4}	2.41	韧−脆转化
1	9.5×10^{-5}	1.11	韧性
0.1	9.5×10^{-6}	0.646	韧性

2.3 三点弯曲试验结果分析

弯曲试验与单轴压缩试验中，试样的受力方式不同，单轴压缩试验时，试样是横截面受力，而三点弯曲的受力点集中在加载点上，应力非常集中，因此冰晶体间发生位错滑移很有限，一般直接在加载点附近发生断裂，不会呈现出多种破坏形式，如图 9(b)，其试验数据一般用强度−位移曲线表示，而三点弯曲中十字头位移数据经处理后可用来表示试样的挠度δ，例如图 9(a)中的强度−位移曲线，曲线在y=2.53 mm 处发生了断崖式下降，这表明试样在挠度为 2.53 mm 处发生了破坏，此时试样的挠度也被称为最大破坏位移。



（a）三点弯曲试验强度-位移曲线



（b）三点弯曲试验冰样本破坏形式

图 9　三点弯曲试验强度−位移曲线与破坏形式

Fig.9　Strength-displacement curve and failure mode of the three-point bending test

本文实验室试验的三点弯曲试验的试样共3块，所测得弯曲强度分别为1.29 MPa, 1.09 MPa, 0.80 MPa, 最大破坏位移分别为2.31 mm, 2.53 mm, 1.76 mm, 杨氏模量分别为210.5 MPa, 176.1 MPa, 181.9 MPa, 破坏处接近加载点。三点弯曲试验结果如表3所示，所测得弯曲强度平均值为1.06 MPa, 方差为0.04, 平均最大破坏位移为2.20 mm, 方差为0.1, 破坏处均接近加载点。弯曲强度和杨氏模量均有较高的离散度，虽然仅有三个样本，但覆盖的弯曲强度范围较广。

表3 三点弯曲冰样试验结果

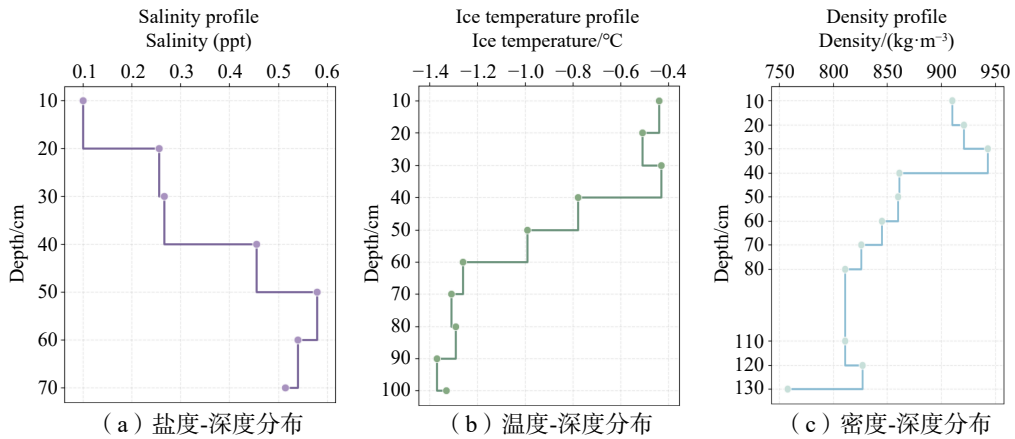
Tab.3 Test results of three-point bending ice specimens

序号	最大破坏位移/mm	弯曲强度/MPa	杨氏模量/MPa
1	2.31	1.29	210.5
2	2.53	1.09	176.1
3	1.76	0.80	181.9

3 与现场试验对比

3.1 现场海冰的物理性质

海冰的温度、盐度和密度会随着深度呈现出一定的空间分布规律，在现场试验中采用冰芯柱分析海冰温盐密随深度的变化，每隔10 cm取样，因此测得的温盐密度可以看作这一深度冰芯段的平均值，将所测得的数据整理如图10所示。



（a）盐度-深度分布 （b）温度-深度分布 （c）密度-深度分布

图10 现场试验海冰的物理性质

Fig.10 Physical properties of field-tested sea ice

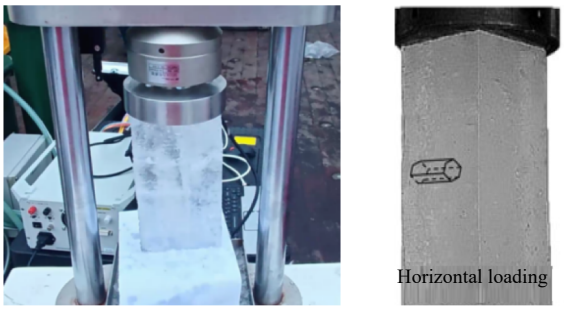
实际工程中海冰的温度既是热过程的基本状态参量，同时也影响着盐度与密度及力学性质，北极进入融冰期后，温度升高，参考2010~2016年北极融冰期冰层温度约为−1.7~−0.1 ℃[16]，本文现场试验测得的冰温约为−1.37~−0.44 ℃，基本一致。融冰期海冰的表层卤水在重力作用向下排泄，使得表层海冰盐度降低，海冰盐度随深度增加而增加，王庆凯[15]分析了2008~2016年北极融冰期海冰平均盐度为1.5~1.7 PPT，平均密度为0.746~0.835 g/cm^3，并认为由于卤水下泄，融冰期海冰表层存在一个深度为20~40 cm的盐度接近于0的等盐层，密度分布为下层海冰大于上层海冰，然而本文现场试验的冰样本盐度仅为0.1~0.57 PPT，平均密度为0.852 g/cm^3，总体来看，与往年数据相比，本文的2024年北极融冰期采样点的海冰卤水流失严重，平均密度变化不大，但密度随深度增加而减小，呈现出了上层密度大于下层密度的特点，而平均密度变化不大可能是由于卤水下泄时其通道破坏了海冰内部的气泡，使气体排出，而卤水流失后空穴中的水重新冻结，纯冰的体积分数增大，进一步排出空气，因此卤水和空气都排出后，海冰表现出了盐度低、密度大、温度高的特点。

本文用于实验室单轴压缩和三点弯曲试验的冰样本均取自约 0~30 cm 深度的冰样本，现场这一深度下的冰样本平均密度为 0.924 g/cm^3，平均盐度为 0.207 PPT，本文实验室冰样本平均密度为 0.898 g/cm^3，平均盐度为 0.172 PPT，因此可以确定在运输途中冰样本的密度和盐度并未发生较大变化。

3.2 单轴压缩试验对比

和实验室试验一样，现场单轴压缩试验采用材料试验机，沿冰样的垂直生长方向加载，现场单轴压缩试验如图 11 所示。

现场试验气温约−2.5 ℃，冰坯采样完成后在空气中放置了一段时间，因此可以默认冰样本已与空气达到热平衡，从同一冰坯上共取 10 个沿垂直生长方向加载的冰样，采用 ITTC 推荐的样本比例 2×1×4(长×宽×高)，加工后冰样本尺寸为 100 mm×50 mm×200 mm(长×宽×高)，选用加载速率为 3、6、15、30、45 mm/min，每个加载速率用两个冰样本做重复试验，试验结果如表 4 所示。



（a）材料试验机压缩冰样本　（b）沿垂直生长方向加载的冰样本

图 11　现场单轴压缩试验

Fig.11　Field uniaxial compression test

表 4　现场试验结果

Tab.4　Test results of field

加载速率 /（mm·min^{-1}）	应变速率 /s^{-1}	平均压缩强度 /MPa	破坏形式
45	3.75×10^{-3}	1.46	脆性
30	2.5×10^{-3}	1.77	韧−脆转化
15	1.25×10^{-3}	1.54	韧性
6	5×10^{-4}	1.49	韧性
3	2.5×10^{-4}	1.53	韧性

现场的单轴压缩试验无法控制环境温度，北极融冰期采样点的气温(−2.5 ℃)高于低温实验室实验温度(−10 ℃)，这也导致了实验室冰样本的温度要低于现场直接采样得到的冰温。参考过去国内外试验研究成果海冰力学强度与温度的强相关性[18]，据此可推测，试验温度差异是造成实验室与现场压缩强度差异的主要影响因素之一。

作为一种物理和力学性质都非常复杂的物质，海冰的单轴压缩强度不仅有温度敏感性，对应变速率也呈现出高度的敏感性。为了分析压缩强度与应变速率间的关系，首先根据实验室试验结果给出压缩强度−应变速率拟合曲线如图 12 所示，实验室试验冰样本的应变速率−压强曲线在韧−脆转化点 4.8×10^{-4} s^{-1} 分成了两个阶段，对这两个阶段曲线的表达式为式(7)，同样地，现场试验的拟合曲线也在韧−脆转化点 2.5×10^{-3} s^{-1} 分为两个阶段，表达式为式(8)。

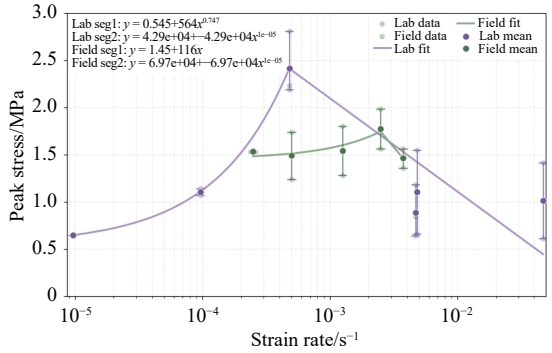


图 12　冰样本的应变速率−压缩强度曲线

Fig.12　Strain rate-compressive strength curve of ice samples

$$\sigma=\begin{cases}4.29\times10^{4}-42\,900\dot{\varepsilon}_c^{1\times10^{-5}}, & 4.8\times10^{-4}\ \mathrm{s^{-1}}\leqslant\dot{\varepsilon}_c\leqslant4.8\times10^{-2}\ \mathrm{s^{-1}}\\ 0.545+564\dot{\varepsilon}_c^{0.747}, & 9.6\times10^{-6}\ \mathrm{s^{-1}}\leqslant\dot{\varepsilon}_c<4.8\times10^{-4}\ \mathrm{s^{-1}}\end{cases}\tag{7}$$

$$\sigma=\begin{cases}1.45+116\dot{\varepsilon}_c, & 2.5\times10^{-4}\ \mathrm{s^{-1}}\leqslant\dot{\varepsilon}_c<2.5\times10^{-3}\ \mathrm{s^{-1}}\\ 6.97\times10^{4}-6.97\times10^{4}\dot{\varepsilon}_c^{1\times10^{-5}}, & 2.5\times10^{-3}\ \mathrm{s^{-1}}\leqslant\dot{\varepsilon}_c\leqslant3.75\times10^{-3}\ \mathrm{s^{-1}}\end{cases}\tag{8}$$

基于现场试验的应变率点位分析实验室试验与现场试验的相对误差，计算两条拟合曲线的方向性相对差(|Lab-Field|/Field)，得到平均相对差 mean=0.2096，在这些现场应变率点上，实验室曲线与现场曲线的平均相对差约 21%，整体量级差异不是很大。一半以上的点差异低于 14%，中位数远低于均值，表明少数较大差异点拉高了均值，这也体现了融冰期冰样本力学性能的复杂性。

总体来看与现场应变率对比，两曲线大部分位置相对差适中(约 10%~20%)，只有一个高差点(≈58%) 拉高总体平均，整体一致性尚可，但从曲线上来看，相同应变速率下现场试验的单轴压缩强度整体要略低于实验室试验，这是由于实验室试验的环境温度更低，导致了冰样本的强度更大[19]。此外，根据曲线的趋势，现场试验冰样本的韧–脆转化点对应的应变速率更大，这是因为冰温越高，冰晶体间更易产生滑移，冰样本更易发生韧性破坏。

3.3 三点弯曲试验对比

海冰的弯曲强度同样受冰温影响明显，海冰的抗弯强度随冰温的降低而增大，这是因为海冰弯曲破坏的过程实际上是冰样本下边缘纤维拉伸破坏的过程，而海冰的抗拉强度也是随冰温的降低而增大，因此海冰的弯曲强度也随冰温的降低而增大。虽然现场进行原位悬臂梁试验可以更加真实地反映工程实际中的海冰弯曲强度，但其工作量大，受环境条件限制较大，因此现场试验同样在冰站取样采用三点弯曲。现场采样时冰坯出现了明显的分层，上层海冰结构完好，厚度约 40 cm，下层海冰融化较为严重，厚度约 80 cm，试验将冰坯分为 9 层进行三点弯曲试验，试样尺寸为 500 mm×70 mm×60 mm(长×宽×高)，采用手动加载的方式，试验装置如图 13(b)所示。



(a) 三点弯曲冰样本　(b) 三点弯曲试验装置

图 13 现场三点弯曲试验

Fig.13 Field three-point bending test

图 14 给出了现场三点弯曲强度随冰层变化的结果。现场弯曲强度随层数增加整体呈近似“C”形分布：表层冰平均弯曲强度较低，约为 0.21 MPa；中部冰强度相对较高；第 4 层以下，弯曲强度随深度增加明显下降，第 9 层平均弯曲强度仅约 0.12 MPa。结合现场冰坯观察和物理性质剖面，推测下层冰受海水融蚀作用更强，密度较低、结构完整性下降，进而使其弯曲承载能力明显减弱。由此可见，现场三点弯曲强度的深度分布总体反映了温度、密度和融蚀状态共同作用下的宏观层状弱化。

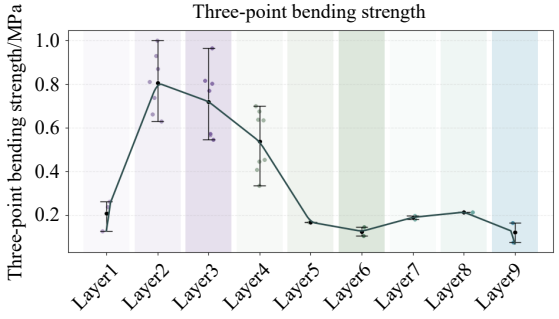


图 14 海冰弯曲强度随冰层变化

Fig.14 Variation of sea ice flexural strength with ice layer

实验室三点弯曲试样数量有限，且与现场 9 层三点弯曲试样并非完整层位对应，因此本文仅将其与现场相近层位作强度水平比较，而不用于解释现场全厚度弯曲强度分布。如图 15 所示，实验室试样平均弯曲强度为 1.06 MPa，高于现场相近层位平均值 0.81 MPa。该差异与实验室温度较低的条件相一

致, 提示温度可能是实验室−现场弯曲强度差异的重要影响因素之一。同时, 三点弯曲强度离散性较大, 反映出弯曲破坏对局部缺陷和裂纹初始位置较为敏感。

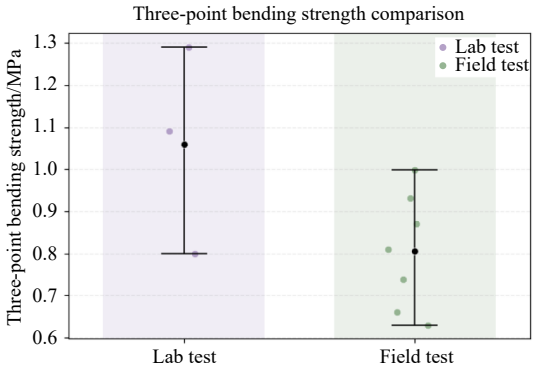


图 15 实验室与现场三点弯曲试验强度对比

Fig.15 Strength comarison between lab and field tests for three-point bending

4 结　论

(1)北极融冰期海冰具有明显的温度敏感性和层状异质性。现场温盐密剖面显示, 2024 年北极融冰期采样区域海冰整体表现为低盐度和较高密度特征, 且密度随深度增加呈下降趋势; 结合现场观测, 提示下层海冰受海水融蚀和结构退化影响更为明显。实验室样本与现场相近层位冰样在密度和盐度上差异较小, 初步提示冷链运输和低温保存未显著改变其基本物理性质。

(2)单轴压缩强度受应变速率和温度共同控制。在−10 ℃ 实验室条件下, 海冰单轴压缩强度随应变速率变化表现出韧−脆转化特征, 在 4.8×10^{-4} s^{-1} 附近达到峰值 2.41 MPa; 现场试验因冰温较高, 整体强度水平和韧−脆转化位置与实验室结果存在差异。结合既有温度效应认识与拟合曲线对比结果, 实验室与现场压缩强度差异与试验温度条件差异相一致, 提示温度是其重要影响因素之一。

(3)三点弯曲强度沿冰层厚度方向呈明显分层变化。现场结果显示, 表层冰弯曲强度较低, 中部冰强度较高, 下层冰因海水融蚀和结构完整性降低而显著弱化, 第 9 层平均弯曲强度降至约 0.12 MPa。实验室三点弯曲平均强度为 1.06 MPa, 高于现场相近层位结果, 进一步提示较低温度条件下冰样弯曲承载能力可能更高。

(4)冰晶与孔隙观测结果为理解力学离散性和结构弱化提供了可能的微观解释。图像识别结果显示, 融冰期海冰孔隙形态和尺寸沿深度方向存在分层差异, 孔隙、晶界和局部连通结构可能成为裂纹萌生与扩展路径。但由于微观观测样本与三点弯曲力学试样并非完全同点位、同层位对应, 本文不将孔隙分布直接作为逐层弯曲强度的定量解释, 而将其作为海冰层状非均质性的微观证据。

(5)实验室−现场对比结果具有工程参考意义, 但工程取值需考虑环境差异和数据离散性。本文结果显示, 在本文试验条件下, 实验室低温环境所得压缩和弯曲强度整体较高, 而现场融冰期高温与融蚀状态下的冰体承载能力相对较弱。对于破冰阻力预报和抗冰结构设计, 不宜直接采用单一平均强度值, 而应结合冰温、层位、融蚀程度和强度离散性选取代表性参数; 在可靠性要求较高的场景下, 可进一步考虑建立强度概率分布模型。

本研究基于有限样本条件下的试验观测, 所得结论可为北极航道通航安全评估、破冰船设计和极地工程结构冰载荷分析提供参考, 也为后续开展同点位、同层位的微观结构−力学性能耦合试验提供依据。

需要指出的是, 受北极现场采样条件和试验组织方式限制, 本文实验室与现场试验在环境温度、试样尺寸及部分加载条件上并非完全一致, 微观结构观测样本与力学试验样本也未实现严格同点位、同

层位对应。因此,本文所得结论主要用于揭示融冰期海冰力学性质的总体变化特征及可能影响因素,相关机制仍需在后续同点位、同层位和更大样本量条件下进一步验证。

参 考 文 献:

[1] Chen J L, Kang S C. The changes of Arctic sea ice and their impacts[J]. Chinese Journal of Nature, 2024, 46(5): 330–336.

[2] Timco G W, Weeks W F. A review of the engineering properties of sea ice[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 60(2): 107–129.

[3] 刚旭皓, 田于逵, 季少鹏, 等. 盐水柱状模型冰弯曲强度试验分析[J]. 船舶力学, 2021, 25(3): 336–341.
Gang X H, Tian Y K, Ji S P, et al. Experimental analysis of bending strength of saline water columnar model ice[J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(3): 336–341. (in Chinese)

[4] 王建康, 曹晓卫, 王庆凯, 等. 冰层弯曲强度和弹性模量与等效冰温的试验关系[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(6): 75–80.
Wang J K, Cao X W, Wang Q K, et al. Experimental relationship between flexural strength, elastic modulus of ice layer and equivalent ice temperature[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(6): 75–80. (in Chinese)

[5] 张丽敏. 冰单轴压缩强度与影响因素试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
Zhang L M. Experimental study on uniaxial compressive strength of ice and its influencing factors[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)

[6] Wang Q, Li Z, Lu P, et al. Flexural and compressive strength of the landfast sea ice in the Prydz Bay, East Antarctic[J]. The Cryosphere, 2022, 16(5): 1941–1961.

[7] 李志军, 张丽敏, 卢 鹏, 等. 渤海海冰孔隙率对单轴压缩强度影响的实验研究[J]. 中国科学: 技术学, 2011, 41(10): 1329–1335.
Li Z J, Zhang L M, Lu P, et al. Experimental study on the influence of porosity on uniaxial compressive strength of Bohai Sea ice[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 41(10): 1329–1335. (in Chinese)

[8] 刘禹博, 王庆凯, 卢 鹏, 等. 粒状海冰单轴压缩强度的试验研究[J]. 船舶力学, 2025, 29(7): 1100–1112.
Liu Y B, Wang Q K, Lu P, et al. Experimental study on uniaxial compressive strength of granular sea ice[J]. Journal of Ship Mechanics, 2025, 29(7): 1100–1112. (in Chinese)

[9] 陈晓东, 王安良, 季顺迎. 海冰在单轴压缩下的韧−脆转化机理及破坏模式[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48(12): 24–35.
Chen X D, Wang A L, Ji S Y. Mechanism of ductile-brittle transition and failure modes of sea ice under uniaxial compression[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2018, 48(12): 24–35. (in Chinese)

[10] 马玉贤, 袁 帅, 史文奇, 等. 海冰温度对单轴压缩强度影响的试验研究[J]. 海洋工程, 2018, 36(3): 117–122.
Ma Y X, Yuan S, Shi W Q, et al. Experimental study on the influence of sea ice temperature on uniaxial compressive strength[J]. Ocean Engineering, 2018, 36(3): 117–122. (in Chinese)

[11] 赵伟航, 余朝歌, 田于逵, 等. 模型冰水平圆盘中心加载弯曲强度试验研究[J]. 船舶力学, 2024, 28(8): 1200–1208.
Zhao W H, Yu Z G, Tian Y K, et al. Experimental study on bending strength of model ice under central loading of horizontal disk[J]. Journal of Ship Mechanics, 2024, 28(8): 1200–1208. (in Chinese)

[12] 孟丁丁, 陈晓东, 季顺迎. 海冰弯曲强度及其破坏过程的试验研究[J]. 海洋通报, 2021, 40(6): 609–620.
Meng D D, Chen X D, Ji S Y. Experimental study on flexural strength and failure process of sea ice[J]. Marine Science Bulletin, 2021, 40(6): 609–620. (in Chinese)

[13] 田于逵, 季少鹏, 王迎晖, 等. CSSRC 小型冰水池中海冰模拟与测试研究[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(2).
Tian Y K, Ji S P, Wang Y H, et al. Sea ice simulation and testing research in the CSSRC small ice tank[J]. Marine Environmental Science, 2021, 40(2). (in Chinese)

[14] 韩红卫. 极区航道海冰时空分布及其物理力学性质研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
Han H W. Study on the spatiotemporal distribution of sea ice and its physical and mechanical properties in polar shipping

routes [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)

[15] 王庆凯. 北极航道融冰期海冰物理和力学工程参数研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
Wang Q K. Study on physical and mechanical engineering parameters of sea ice during the melting period of arctic shipping routes [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)

[16] 余朝歌. 典型海工抗冰结构冰载荷研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2021.
Yu C G. Study on ice load of typical offshore anti-ice structures[D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2021. (in Chinese)

[17] 修苑人, 李志军, 王庆凯, 等. 辽东湾粒状海冰弯曲力学行为试验研究[J]. 海洋通报, 2023, 42(6): 667–676.
Xiu Y R, Li Z J, Wang Q K, et al. Experimental study on the flexural mechanical behavior of granular sea ice in the Liaodong Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2023, 42(6): 667–676. (in Chinese)

[18] 丁德文. 工程海冰学概论[M]. 北京: 海洋出版社, 1999.
Ding D W. Introduction to engineering sea ice science[M]. Beijing: China Ocean Press, 1999. (in Chinese)

[19] 李志军, 孟广琳, 隋吉学. 辽东湾海冰单轴压缩长期强度的初步分析[J]. 海洋学报 (中文版), 1991(4): 571–575.
Li Z J, Meng G L, Sui J X. Preliminary analysis of long-term uniaxial compressive strength of sea ice in the Liaodong Bay[J]. Acta Oceanologica Sinica (Chinese Edition), 1991(4): 571–575. (in Chinese)