文章编号：1007−7294(2026)07−1147−11

极地船舶与极端冰脊碰撞下结构响应预报研究

柴　威[1,2]，卞安祺[2]，董海波[3,4]，赵　南[3,4]，袁奎霖[5]，宋　明[6]

（1. 高性能船舶技术教育部重点实验室(武汉理工大学)，武汉 430063；2. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院，武汉 430063；3. 中国船舶科学研究中心，江苏 无锡 214082；4. 船舶结构安全全国重点实验室，江苏 无锡 214082；5. 大连海事大学 船舶与海洋工程学院，辽宁 大连 116026；6. 江苏科技大学 船舶与海洋工程学院，江苏 镇江 212003）

摘要：针对极地船舶在极端冰脊碰撞工况下的结构安全问题，本文基于环境等值线法和极地典型海域冰脊重要参数实测数据，构建了 50 年一遇冰况的极端冰脊尺度预测模型。以某 PC3 级破冰船为研究对象，建立了船与冰脊碰撞的有限元模型，考虑不同冰脊尺度与冲撞速度，对船与冰脊碰撞力时历、船体外板吸能及船体结构典型构件应力响应进行了预报。结果表明，冰脊固结层厚度是决定船体结构响应的关键因素，较大固结层厚度显著增加结构吸能及构件应力水平，外板与横向骨架为碰撞中的主要受损构件，最危险工况中其局部应力可超出材料强度极限。本文提出的基于环境等值线法确定极端冰脊工况的方法，可用于极地船舶结构安全分析，为极地船舶安全和航行风险评估提供重要参考。

关键词：冰脊碰撞；极值预报；环境等值线法；结构响应

中图分类号：U661.32　　**文献标识码：**A　　**doi:** 10.3969/j.issn.1007−7294.2026.07.009

Structural response prediction of a polar ship under collisions with extreme ice ridges

CHAI Wei[1,2], *BIAN An−qi*[2], *DONG Hai−bo*[3,4], *ZHAO Nan*[3,4], *YUAN Kui−lin*[5], *SONG Ming*[6]

(1. Key Laboratory of High Performance Ship Technology (Wuhan University of Technology), Ministry of Education, Wuhan 430063, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 3. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China; 4. National Key Laboratory of Ship Structural Safety, Wuxi 214082, China; 5. Naval Architecture and Ocean Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 6. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: To address the structural safety issues of polar ships subjected to collisions with extreme ice ridges, this study proposes a predictive framework for extreme ice ridge geometries corresponding to a 50-year return period. The model is developed based on the environmental contour method and statistical analysis of measured data from representative polar sea areas. A finite element model simulating the collision between a PC3-class icebreaker and ice ridges is established, incorporating variations in ridge scale and impact velocity. The study investigates the time histories of ice-induced impact forces, energy absorption of the hull outer plating, and stress responses of critical structural components. The results demonstrate that the

收稿日期：2026−02−16

基金项目：国家自然科学基金资助项目(52201379)；湖北省海外高层次人才项目(109-40120973)

作者简介：柴　威(1988–)，男，教授；

宋　明(1988–)，女，副教授，通讯作者，E-mail：songmingcssc@163.com。

consolidated layer thickness is the key parameter influencing structural response; an increase in this thickness significantly amplifies the hull's energy absorption and stress levels. The outer plating and transverse frames are identified as the primary vulnerable components, with localized stress levels exceeding the material yield strength under the most severe scenarios. The proposed methodology, which integrates extreme ice condition modeling with structural response prediction, provides a valuable basis for the safety assessment and risk analysis of polar ships operating in harsh ice-infested environments.

Key words: ice ridge collision; extreme value prediction; environmental contour method; structural response

0 引　言

随着全球气候变暖和极地资源开发加速，极地航运需求日益增长，极地船舶冰区航行安全问题成为研究热点。冰脊作为极地冰区常见的恶劣冰况，其形态复杂且力学性质多变，与周围层冰相比，其具有更大的尺度参数。极地船舶与极端冰脊碰撞可能导致船体结构严重受损。

目前对冰脊的研究主要集中在形态统计、力学特性及与结构物作用机理上。Timco 等[1] 基于大量实测数据，建立了一年生和多年生冰脊几何特征关系，提出了典型冰脊尺度参数。Dolgopolov 等[2] 提出了适用于固定海洋结构与冰脊作用的冰载荷预报模型，但其主要适用于静态或准静态载荷工况，对于船-冰脊碰撞下的动力响应难以进行准确评估。Høyland 等[3] 通过现场测试和实验室单轴压缩测试对冰脊的不同成分进行评估，分析了盐度、密度等因素对其力学性能的影响。Polojärvi 等[4] 开展了冰脊龙骨贯穿实验，分析了不同加载速率下龙骨碎冰部分力学响应及破坏特性。朱红日和季顺迎[5] 提出基于粘结球体单元和多面体单元组合的离散元模型，用于模拟冰脊压剪试验与对直立结构载荷影响，将仿真结果与相关规范进行了对比。Serré[6] 考虑冰脊内粘聚力机制，通过实验测量与数值模拟提出了一种冰脊材料本构模型。Zhao 等[7] 基于典型尺度冰脊并采用光滑帽盖模型（Continuous Surface Cap Model, CSCM）研究了冰脊龙骨部分的剪切失效特性。现有研究多采用确定性冰脊参数进行仿真分析，缺乏基于长期环境统计的极端冰脊预报方法，导致结构安全评估分析具有显著的不确定性。

环境等值线法作为一种用于长期极端响应预测的可靠性分析方法，已广泛应用于船舶与海洋工程结构响应极值预报研究。该方法通过构建特定重现期下的环境等值轮廓，显著降低了极端响应预报所需工况数量，提升了评估效率，确保了计算可行性。已有研究将其应用于冰体弯曲强度及海冰厚度等参数的联合建模[8–9]，但在极端冰脊作用下极地船舶结构响应预报方面仍存在空白。

本文基于极地冰脊实测数据，结合环境等值线理论，构建了极端冰脊集合模型，选取并确定了典型冰脊作为极端工况。通过数值仿真，分析不同极端冰脊工况下船体结构响应情况，揭示冰脊重要尺度参数对船体结构响应的影响规律，为极地船舶安全评估提供支撑。

1 冰脊特性

1.1 典型冰脊结构

冰脊是指由于极地海域洋流作用，海上浮冰与冰排持续相互挤压、碰撞，产生的碎冰逐渐堆叠冻结形成新冰体。冰脊的力学性质较层冰更为复杂，其结构由水线以上的脊帆、水线以下的固结层及碎冰层组成。其中，水线以下碎冰与固结层的组合被称为龙骨，其宽度大于脊帆，并向周围冰层下方延伸。图 1 展示了冰脊的结构示意图。

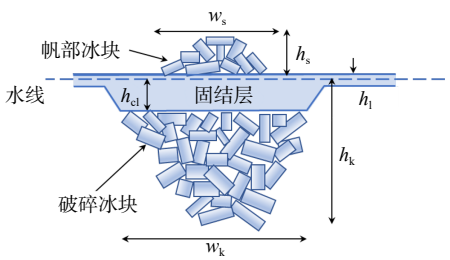


图 1 冰脊结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the ice ridge structure

冰脊的脊帆部分由冰面以上冰块堆积而成，其强度相对较低。固结层由重新冻结的碎冰或浮冰组成，由于冻结速率通常高于层冰，其厚度显著大于周围层冰。固结层以下碎冰部分包含大量冰块，其体积显著大于脊帆部分。在冰脊结构中，龙骨部分是决定冰脊力学特性的关键因素。因此，龙骨部分具有代表性的几何参数，如固结层厚度与龙骨深度对于船与冰脊碰撞响应预报具有重要作用。

Timco 等[1] 汇总了不同区域冰脊的形态特征参数，建立了各形态参数之间的关系，其中 w_s 为脊帆宽度，w_k 为龙骨宽度，h_s 为脊帆高度，h_k 为龙骨深度。一年生冰脊形态特征为：龙骨深度与脊帆高度之比约为 4.4，龙骨宽度与脊帆高度之比约为 15.1，龙骨宽度与龙骨深度之比约为 3.9。本研究将基于此形态特征关系建立相应的仿真模型。

1.2 冰脊力学性质

冰脊各组成部分的材料性质随固结程度不同存在显著差异。孔隙率作为冰脊固结程度指标，通常以体积比表示，其值越高表明冰脊强度越低。粘聚力由低温环境下冰块间的冻结作用形成，反映了冰脊内部冻结连接的强度。内摩擦角表征冰块间摩擦力的大小，其值越大表明冰脊的抗剪强度越高。冰脊力学行为受这三种材料属性影响，导致冰脊各结构呈现出不同的破坏失效模式。

冰脊固结层部分的力学性质与层冰相近，当与船舶发生碰撞时主要表现为压缩破坏。固结层在形成过程中经历了反复冻结和压实，具有较高的抗压强度和较低的孔隙率。根据 Timco 等[10] 的研究，固结层抗压强度可以通过以下公式估算

$$\sigma_c = \alpha \cdot \rho \cdot (1 - v) \tag{1}$$

其中，σ_c 为抗压强度，单位为 Pa；α 为与温度相关的系数，单位为 m^2/s^2；ρ 为冰的密度，单位为 kg/m^3；v 为孔隙率，为无量纲数。

龙骨碎冰由于其孔隙率较大，冰块之间的连接较为松散，在剪切作用下表现出较高的脆性，容易发生剪切破坏。根据 Lunard[11] 的研究，抗剪强度可以表示为

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan\phi \tag{2}$$

其中，τ 为抗剪强度，c 为粘聚力，σ_n 为法向应力，ϕ 为内摩擦角。

2 环境等值线法

2.1 环境等值线法理论

船舶与海洋结构物需承受风、浪、冰等环境载荷，极端载荷与响应的预报对结构设计至关重要。环境等值线法通过将环境变量联合概率描述与结构响应计算过程相分离（解耦），即先构建给定重现期的环境等值线，再选取具有代表性且恶劣的环境工况进行结构分析，从而高效评估结构物长期极端响应与安全性。此方法仅需对环境等值轮廓上的少数关键工况进行短期分析，随后通过数值模拟或实验确定关键工况对应的响应值，以评估结构的安全性能。针对特定重现期 N 年的环境等值轮廓构建方法如下：

结构在 N 年重现期下的失效概率为 P_f，其计算方法为

$$P_f = 1/N \tag{3}$$

采用传统逆一阶可靠度方法，在标准化空间（U-空间）中创建一个半径为 β_F 的 n-维超球体（$n=2$ 时为圆，$n=3$ 时为球体）。β_F 的值由以下公式确定

$$\beta_F = \Phi^{-1}(1 - P_f) \tag{4}$$

其中，Φ 代表标准正态分布的累积密度函数。

结合环境参数联合概率分布，采用 Nataf 变换模型等方法将 n-维超球体映射到物理参数空间，生成与 N 年重现期对应的环境等值轮廓。当 $n=2$ 和 3 时，环境等值轮廓分别呈现为环境等值线与环境等值面。以冰脊为例，选取固结层厚度和龙骨深度作为关键形态参数，通过概率模型描述其分布特性，设变量 s_1 和 s_2 分别代表固结层厚度和龙骨深度，ρ_{12} 表示变量的相关系数，采用 Nataf 变换模型将标准化空

间中半径为 β_{F} 的圆转换为物理参数空间的环境等值线，其转换关系如下

$$F_{S_1}(s_1)=\Phi(u_1) \tag{5}$$

$$F_{S_2}(s_2)=\Phi\left(u_2\sqrt{1-\rho_{12}'^2}+\rho_{12}'\Phi^{-1}\left(F_{S_1}(s_1)\right)\right) \tag{6}$$

其中，u_1、u_2 代表独立的标准正态变量，其值可通过以下方程求得

$$\sum_{i=1}^{2}u_i^2=\beta_{\mathrm{F}}^2 \tag{7}$$

系数ρ_{12}'是在 Nataf 变换中使用的等效相关系数，与 ρ_{12} 的关系可通过一个半经验方程近似表示

$$\rho_{12}'=\xi\cdot\rho_{12} \tag{8}$$

其中，ξ 的取值可参考文献[9]。在建立环境等值线后，可从中选取若干组环境条件作为设计工况。对这些选定的工况进行数值计算，识别出最为显著的结构响应以及工况条件，即可近似预报 N 年重现期下的长期极端响应，并据此评估结构安全性[12]。

2.2 极端冰脊预报

根据 2.1 节中的相关理论，建立环境等值线需得到固结层厚度和龙骨深度的概率分布。固结层厚度取决于地理区域、环境条件和季节。基于 2002–2011 年北极典型海域实测冰脊固结层厚度数据[13]，其厚度可用伽马分布来描述

$$f(h_{\mathrm{cl}})=\frac{1}{\Gamma(k)\theta^k}h_{\mathrm{cl}}^{k-1}\exp\left(-\frac{h_{\mathrm{cl}}}{\theta}\right) \tag{9}$$

其中，k 和 θ 分别代表伽马分布的形状参数和尺度参数。根据实测数据，其取值分别为 2.97 和 0.54。固结层厚度样本数据及对应的伽马分布概率密度函数如图 2 所示。

对北极典型海域一年生冰脊的龙骨吃水深度数据进行分析表明，可采用三参数 Weibull 分布对数据进行拟合，其概率密度函数形式为

$$f(h_{\mathrm{k}})=\frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{h_{\mathrm{k}}-b}{\alpha}\right)^{\beta-1}\exp\left(-\left(\frac{h_{\mathrm{k}}-b}{\alpha}\right)^{\beta}\right) \tag{10}$$

其中，尺度参数 α 为 9.464，形状参数 β 为 1.697，位置参数 b 为 0.450。概率密度函数与样本的拟合结果如图 3 所示。

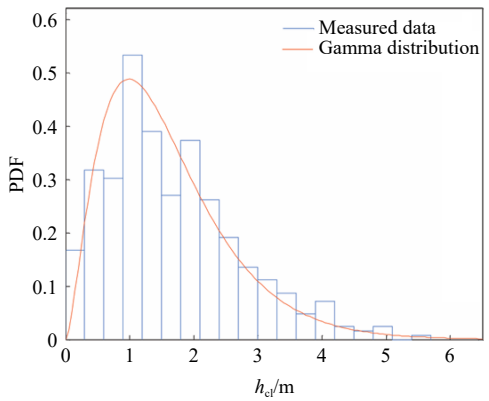


图 2 固结层厚度 h_{cl} 概率分布图[9]

Fig.2 Probability distribution of the consolidated layer thickness h_{cl}

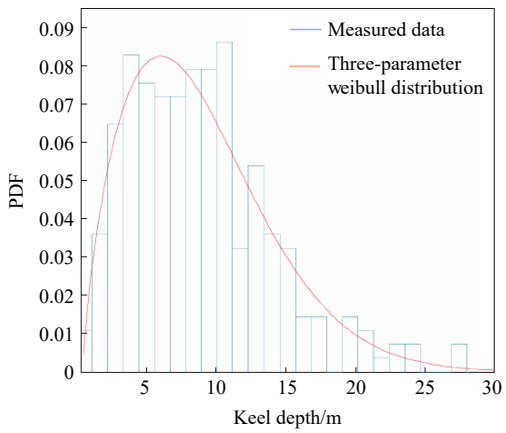


图 3 龙骨深度 h_{k} 概率分布图[9]

Fig.3 Probability distribution plot of the keel depth h_{k}

假设所选极地船舶每年在冰脊区域航行 5000 公里，沿航线冰脊密度为每公里 2 个。对于 50 年重现期，失效概率 P_{f} 确定为：$P_{\mathrm{f}}=1/(50\times5000\times2)$，根据参考文献[9]，固结层厚度与龙骨深度的相关系数 ρ_{12} 和ρ_{12}'分别取为 0.5 和 0.56。基于 2.1 节环境等值线理论和冰脊固结层厚度及龙骨深度的统计关系，

可绘制如图 4 所示的 50 年重现期的环境组合等值线。

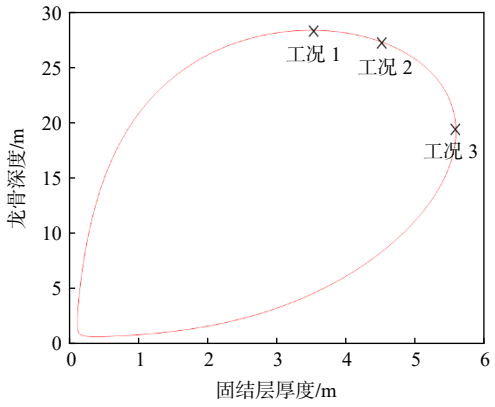


图 4　50 年重现期冰脊环境等值线

Fig.4 Evironmental contour for ice ridges with a return period of 50 years

考虑到冰脊形态学特征，等值线下端对应浅脊/碎冰堆积，难以代表工程意义上的极端大尺度冰脊。因此，在环境等值线上选取设计点，作为极地船舶可能遭遇的极端危险工况，进行结构响应评估。三个典型工况分别命名为工况 1（深龙骨型）、工况 2（深龙骨–厚固结折中型）和工况 3（厚固结层型），固结层厚度分别为 3.5 m、4.5 m、5.5 m，龙骨深度分别为 28.2 m、26.8 m、20.9 m。其选择依据分别为工况 1（深龙骨型）：在环境等值线选取最大龙骨深度点，以代表龙骨冲击或挤压最显著、局部接触力与结构吸能可能最大的情形；工况 2（深龙骨–厚固结层折中型）：取高龙骨深度同时固结层厚度较大的组合，用于评估固结层承载与龙骨挤压效应；工况 3（厚固结层型）：取固结层厚度较大的点，用于评估厚固结层导致外板及骨材变形等情况，其余冰脊尺度参数由 1.1 节所述形态统计关系计算得出，如表 1 所示。

表 1　极端冰脊模型尺寸

Tab.1　Parameters of extreme ice ridges

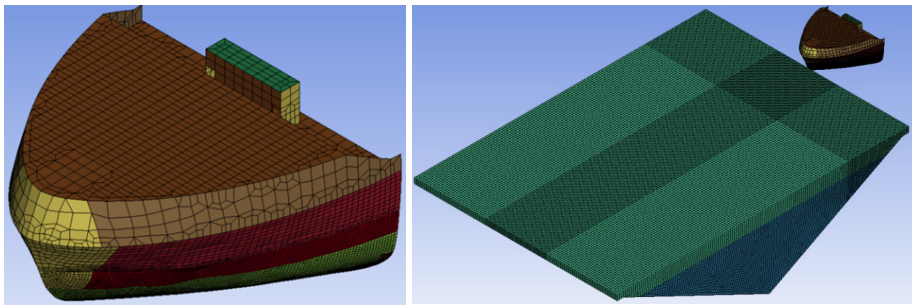
模型	固结层厚度h_{cl} /m	龙骨深度h_k /m	龙骨宽度w_k /m
工况1	3.5	28.2	109.98
工况2	4.5	26.8	104.52
工况3	5.5	20.9	81.51

3　船-冰脊碰撞仿真

3.1 船-端冰脊碰撞模型建立

选择冰级为 PC3 的某破冰船作为研究对象，主尺度为总长 122.5 m，船宽 22.3 m，吃水 7.85 m，排水量 13 996 t。船体及骨架均采用壳单元进行建模，为提高计算效率，上层甲板附近非碰撞区域的网格尺寸设置为 0.8 m×0.8 m，并通过碰撞区域网格逐步细化至 0.4 m[14]。

不同尺度的极端冰脊模型与船艏模型碰撞示意图分别如图 5 所示，上部为固结层部分，下部为龙骨碎冰部分，冰脊长度为 80 m。为缩减计算时长，在有限元软件 LS-DYNA 中对冰脊模型与船体碰撞



（a）船艏模型　　（b）船-冰脊相互作用

图 5　极端冰脊模型与船艏模型碰撞示意图

Fig.5　Schematic of the collision between the extreme ice ridge model and the bow model

的重点区域网格进行局部细化，由 0.8 m 逐渐细化至 0.4 m，左右两端刚性约束，船艏模型限制 Y 轴与 Z 轴方向的运动。采用 CONTACT_ ERODING_SURFACE_TO_SURFACE 接触模型来定义船艏与冰脊之间的相互作用，摩擦系数设为 0.15。

3.2 材料模型选取

为简化模型并提高计算效率，暂不考虑冰脊帆部的作用影响，冰脊模型仅由固结层和龙骨碎冰部分组成。根据现有冰脊力学特性的研究成果，固结层的力学性质与周围层冰相似，可采用蔡伟等[15]提出的 MAT_78 号本构模型进行仿真模拟，其考虑椭圆屈服包络线准则，能够较好地体现层冰的挤压失效特性，如下式所示

$$F(p,J_2)=J_2-\left(a_0+a_1+a_2p^2\right)=0 \tag{11}$$

式中：J_2 是应力偏张量中的第二不变量；a_0、a_1、a_2 为需要拟合三轴实验数据的常数，a_0 决定冰体基础强度，a_1 决定冰体强度随围压增加的速度，a_2 决定这种变化是线性还是非线性。

固结层冰材料具体参数如表 2 所示。

表 2 冰材料参数（MAT_SOIL _CONCRETE）[15]

Tab.2 Parameters of ice material (MAT_SOIL_CONCRETE)

材料属性	数值	材料属性	数值
材料密度ρ/(kg·m^{-3})	900	截断压力P_{cut}/MPa	−8
剪切模量G/GPa	5.26	最大等效应力$\bar{\sigma}_{\max}$/MPa	10
体积模量K/GPa	3.30		

龙骨碎冰部分由于孔隙率等因素的影响，其强度低于固结层。Zhao 等[7]采用基于 CSCM 本构关系的冰材料模型模拟一年生冰脊龙骨的力学特性，其破坏面被定义为

$$F_{\mathrm{f}}(J_1)=\alpha-\lambda\exp(-\beta J_1)+\theta J_1 \tag{12}$$

其中，F_{f} 是失效强度函数，J_1 是偏应力张量的第一不变量；α、θ、λ 和 β 是用于匹配三轴压缩特性的模型参数。各向同性硬化面由下式定义

$$F_{\mathrm{c}}(J_1,\kappa)=1-\frac{[J_1-L(\kappa)]\,[|J_1-L(\kappa)|+J_1-L(\kappa)]}{2[X(\kappa)-L(\kappa)]^2} \tag{13}$$

其中，F_{c} 是 CSCM 模型中用于描述龙骨碎冰在高压下压密硬化行为的相关函数，κ 表示控制该函数关系的硬化参数，$L(\kappa)$和 $X(\kappa)$定义了该函数的几何形状。

该材料对于龙骨碎冰模拟的准确性通过了穿透剪切试验验证，具体参数如下表 3 所示。

表 3 龙骨部分冰材料参数[6]

Tab.3 Ice material parameters for the keel part

材料属性	数值	材料属性	数值
剪切模量G/MPa	17.31	二次形状参数D_2	0.65
体积模量K/MPa	37.5	韧性形状软化参数B	20
压缩表面参数α	0.016	单轴压缩断裂能G_{fc}	0.4
压缩表面参数θ	0.182	脆性形状软化参数D	1
顶部椭圆度比R	9.44	单轴拉伸断裂能G_{ft}	0.065
顶部表面初始截距X_{D}	0.595	单轴纯剪断裂能G_{fs}	0.065
最大塑性体积应变W	0.05	单轴压缩应力速率效应参数$\eta_{0\mathrm{C}}$	10.976
线性形状参数D_1	0.001	单轴压缩应力速率效应功率N_{C}	0.093 783

为考虑船-冰相互作用过程中结构应变率影响，船艏采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 材料，以准确模拟材料的弹塑性行为，钢材模型为 DH36 钢，其材料参数如表 4 所示。

表 4　船体材料参数

Tab.4　Parameters of ship hull material

材料属性	数值	材料属性	数值
密度/(kg·m^{-3})	7850	剪切模量G/GPa	54.5
泊松比v	0.3	应变率参数 C	40.4
屈服应力σ_s/MPa	434	应变率参数 P	5
弹性模量E/GPa	215		

应变率参数 C 和 P 取自 Cowper 和 Symonds 模型[16]，此模型通过如下式中的因子来缩放屈服应力

$$\frac{\sigma_{\mathrm{yd}}}{\sigma_{\mathrm{y}}}=1+\left[\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right]^{1/P} \tag{14}$$

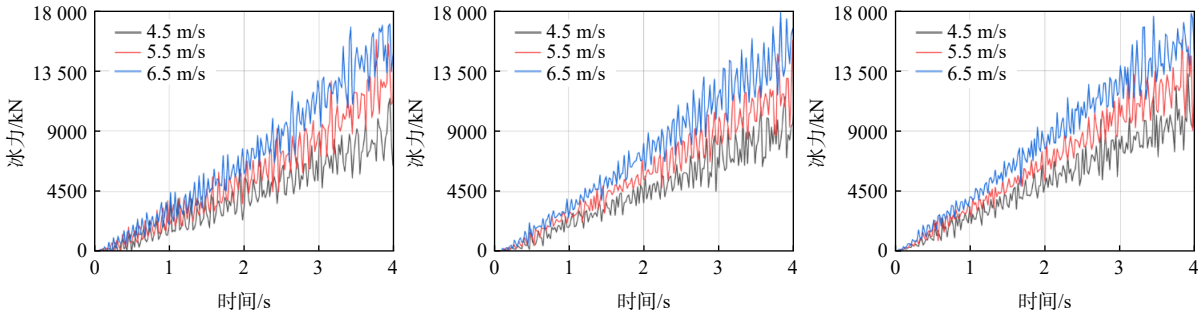
式中：σ_{yd} 为考虑应变率影响的屈服强度，$\dot{\varepsilon}$为等效塑性应变率。

4　极端冰脊作用下船体结构响应分析

参考相关规范[17]，PC3 级破冰船采用冲撞式破冰作用时，速度应不低于 4.5 m/s。为探究不同尺度极端冰脊作用下船体的结构响应，船艏模型分别以 4.5 m/s、5.5 m/s、6.5 m/s 速度冲撞不同尺度极端冰脊，碰撞时间均设定为 4 s。

4.1 碰撞力与吸能特性

基于环境等值线确定的不同尺度极端冰脊工况下破冰船碰撞力时历曲线如图 6 所示。船与冰脊碰撞进程中冰体持续破碎，碰撞力呈振荡特征且随速度增加呈增长趋势。当冲撞速度达到 6.5 m/s 时，工况 1 下的冰力均值为 7178.20 kN；工况 2 下的冰力均值为 7396.40 kN；工况 3 模型作用下的冰力均值为 8243.67 kN，较工况 1 增加了 14.8%，较工况 2 增加了 11.5%。这表明不同尺度极端冰脊工况下碰撞力变化趋势和大小存在一定差异。船艏外板吸能由部件内各单元积分点处的应力–应变增量功累积得到，不同尺度极端冰脊作用下船艏外板吸能时历曲线如图 7 所示。



（a）工况 1　　（b）工况 2　　（c）工况 3

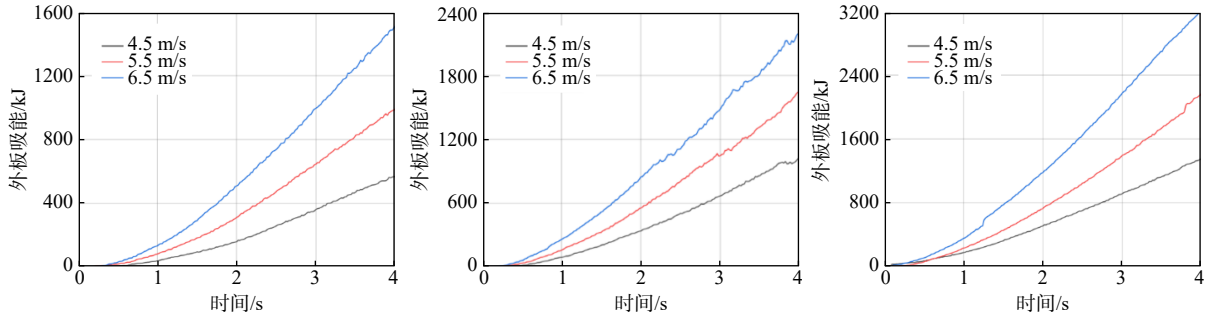
图 6　不同尺度极端冰脊作用下碰撞力时历曲线

Fig.6　Collision force curves at different scales under the action of extreme ice ridges

船体外板作为船体结构主要能量吸收构件，其吸能特性分析对揭示尺度因素影响至关重要。由图 7 可知，工况 1 和工况 2 下船艏外板吸能差异较小，表明二者对船体吸能特性影响相近。而工况 3 下，各速度工况的船艏外板吸能值显著增加，约为其他两种工况的两倍。当冲撞速度为 6.5 m/s 时，工况 1、2、3 下的船艏外板吸能最大值分别为 1509.86 kJ、2135.36 kJ 和 3189.99 kJ，工况 3 较工况 1 增加了 111.3%，较工况 2 增加了 49.4%。这表明冰脊尺度变化会显著影响船艏外板的吸能能力，尤其在较大尺度冰脊工况下，船体结构将承受更严重的能量冲击。

如图 8 所示为冲撞速度为 6.5 m/s 时不同时刻下工况 3 冰脊破碎情况。结合表 1 所示各冰脊模型尺度分析可知，工况 3 冰脊体积较小，龙骨碎冰部分较少，但固结层厚度较大，船艏与冰脊固结层相互作

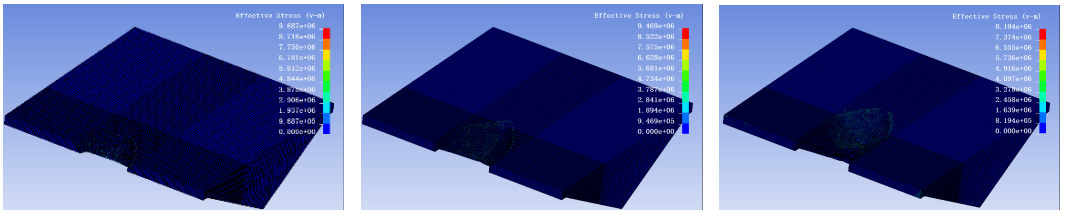
用更剧烈, 导致船体外板吸能较多。由此可知, 在冰脊作用下, 固结层厚度是影响船体结构能量吸收的主要因素。



（a）工况 1　　（b）工况 2　　（c）工况 3

图 7 不同尺度极端冰脊作用下外板吸能时历曲线

Fig.7 Energy absorption curves of outer plates under extreme ice ridges of different scales



t = 2.5 s　　t = 4.5 s　　t = 6.5 s

图 8 不同时刻下冰脊破碎情况

Fig.8 Ridge fragmentation at different periods

4.2 船体典型构件应力

选取船艏模型典型碰撞位置单元进行应力分析, 如图 9 所示。根据典型碰撞位置单元应力时域曲线进行平均求解, 各工况下该单元等效应力均值随速度的变化曲线如图 10 所示。结果表明, 各冰脊模型作用下船体结构的平均应力均随速度增加而增大。工况 1 和工况 2 冰脊模型作用下船体应力相近, 且小于工况 3 模型作用下的应力。工况 3 下速度为 6.5 m/s 时, 等效应力均值最大, 达 132.7 MPa。

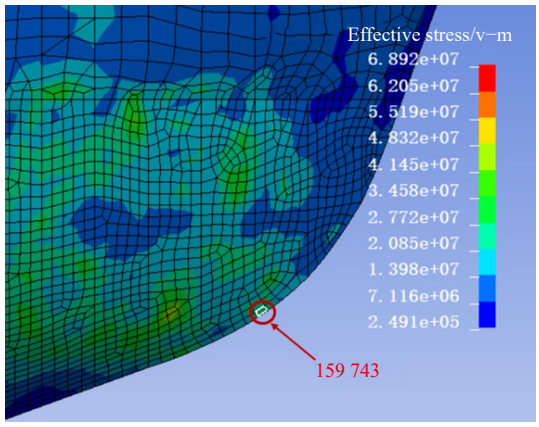


图 9 典型碰撞位置单元

Fig.9 Typical element of collision

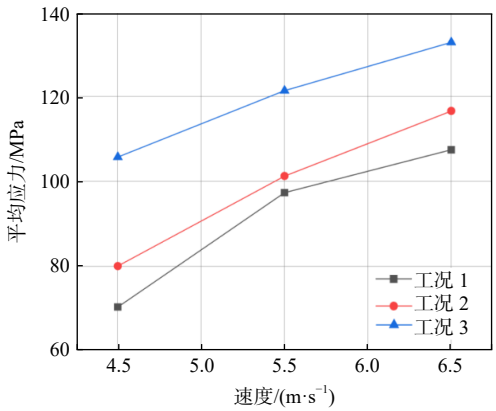
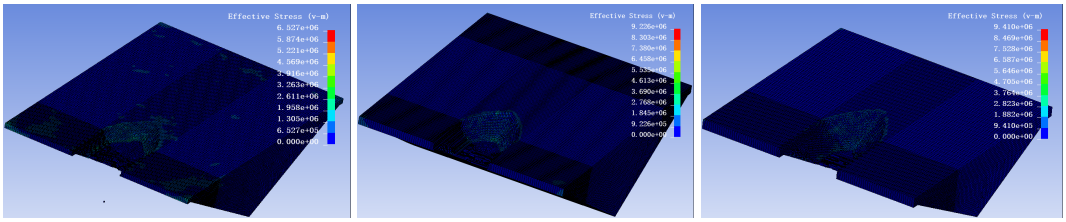


图 10 不同尺度极端冰脊作用下碰撞位置平均应力-速度曲线

Fig.10 Average stress-velocity curves under extreme ice ridges at different sizes

结合各冰脊模型的尺度特征及图 11 所示速度为 6.5 m/s 时冰脊底部破碎情况, 碰撞力如图 12 所示。工况 1 固结层厚度较小但龙骨宽度较大, 相同船艏前进距离下冰脊固结层破碎长度较短, 龙骨部分受力较小, 冰体破碎程度较低。随固结层厚度增加, 龙骨宽度减少, 船艏对冰脊破坏程度增加, 冰体破碎

程度不断增大。工况 3 固结层厚度较大，但冰体破碎较多，船体结构与冰脊的相互作用更剧烈，这种相互作用导致碰撞力增大，船体结构吸收能量较多，从而使工况 3 下船体结构应力值升高，船体更易发生结构损伤。速度为 6.5 m/s 时，工况 3 下船体等效应力均值分别为工况 1、工况 2 的 1.5 与 1.32 倍。由此表明，冰脊固结层厚度是影响船体结构力学响应的重要因素，较大固结层厚度会显著增加船体损伤风险。



（a）工况 1　　（b）工况 2　　（c）工况 3

图 11　不同尺度极端冰脊破碎情况

Fig.11　Extreme ridge fragmentation at different scales

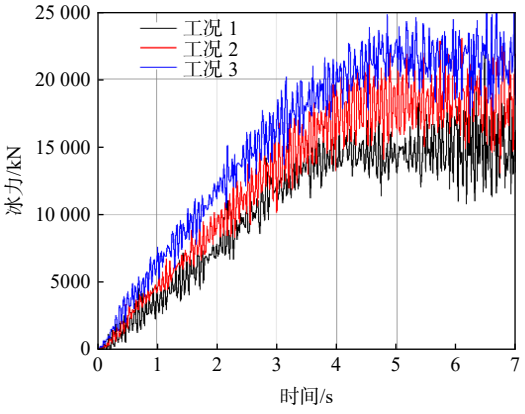
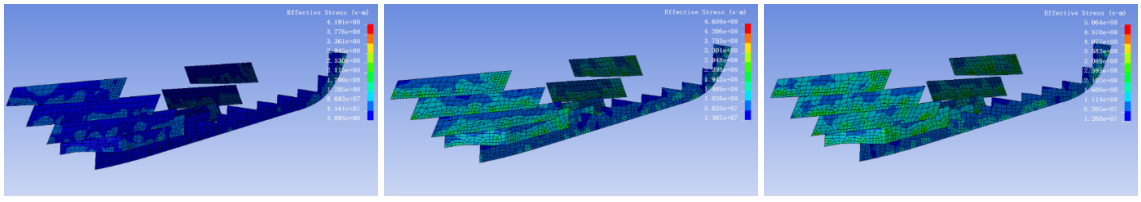


图 12　不同尺度极端冰脊碰撞力

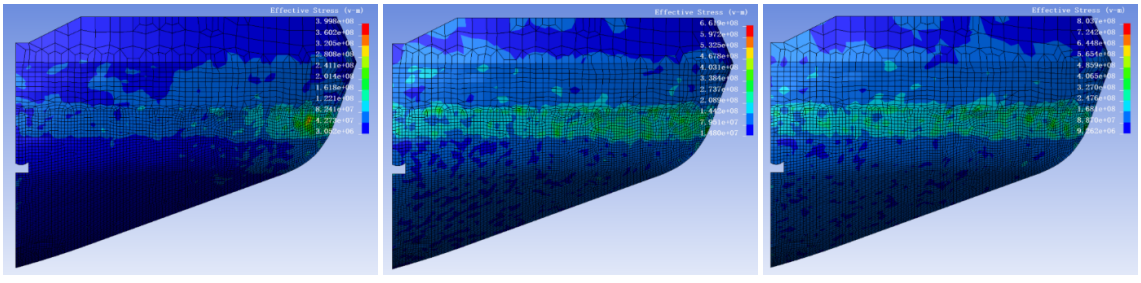
Fig.12　Collision forces of extreme ice ridges at different scales

选取最恶劣工况对船体承载能力进行分析，冲撞速度 6.5 m/s 时，工况 3 冰脊模型作用时船体响应最为剧烈，图 13 展示了该工况下纵向构件、船艏外板和横向构件于 0.5 s、1.5 s、2.5 s 时等效应力云图。



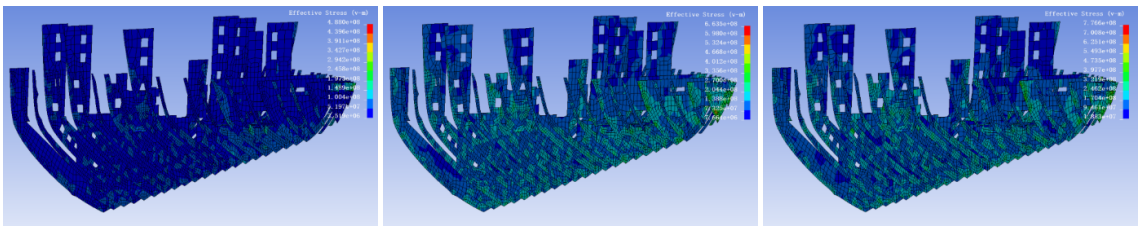
t = 0.5 s　　t = 1.5 s　　t = 2.5 s

（a）纵向构件



t = 0.5 s　　t = 1.5 s　　t = 2.5 s

（b）船体外板



t = 0.5 s t = 1.5 s t = 2.5 s

（c）横向构件

图 13 不同船体构件应力云图

Fig.13 Stress contours of different hull components

由图 13 中对比显示，横向构件与船体外板应力水平较高，表明两者为承受冰载荷的主要结构，且各构件应力值均随作用时间逐渐增大。提取冲撞速度为 6.5 m/s 时，不同工况下各结构等效应力最大值如表 5 所示，以船体材料的屈服强度 434 MPa 作为应力安全阈值进行船体结构损伤风险分析。各工况下船体外板与横向构件均有部分区域应力值超出结构屈服强度，实际碰撞中将发生塑性变形。纵向构件响应虽小于船体外板与横向构件，但应力最大值均已超出材料屈服强度，存在结构破坏风险。

表 5 不同工况下船体构件应力最大值

Tab.5 Maximum stress of hull components under different conditions

模型	应力最大值/MPa		
	纵向构件	船体外板	横向构件
工况1	487.15	731.21	774.59
工况2	495.67	754.56	791.87
工况3	506.41	776.64	803.75

结果表明，与 50 年重现期下的极端冰脊碰撞作用将对船体结构产生损伤，船体结构响应值超过材料本身的屈服强度。同时，横向构件和船体外板是船艏结构在极端冰脊碰撞中的关键易损部位。船体结构设计与优化时，应着重强化外板和横向构件的结构强度，以提升船舶在极端冰脊环境下的安全性和可靠性。

5 结 论

本研究通过数值模拟揭示了不同尺度极端冰脊对破冰船艏结构的碰撞作用机理。基于极地冰脊实测数据，结合环境等值线法和统计理论构建极端冰脊参数预报模型，选取固结层厚度 3.5 m（工况 1）、4.5 m（工况 2）、5.5 m（工况 3）三类典型冰脊作为极端工况。通过有限元仿真对比船艏碰撞响应，获得以下结论：

（1）收集冰脊实测数据，根据环境等值线及统计理论对极端冰脊重要参数、固结层厚度与龙骨深度间的关系进行预报，得到了极地典型海域 50 年一遇的极端冰脊尺度等值线。

（2）对比三种极端冰脊模型下的船体结构响应，固结层厚度为 5.5 m 的工况 3 冰脊模型为最危险冰况，固结层厚度为冰脊作用下船体结构响应的主要影响因素。冲撞速度为 6.5 m/s 时，该工况下外板碰撞吸能分别比另外两工况高 111.3% 和 116.2%。

（3）与 50 年一遇的极端冰脊模型碰撞作用将对船体结构造成损伤。工况 3 在冲撞速度 6.5 m/s 时，船体外板与横向骨架构件受到的等效应力超过材料屈服强度。因此，极地船舶结构设计时应对船体外板与横向构件的承载能力进行重点评估。

参 考 文 献：

[1] Timco G W, Burden R P. An analysis of the shapes of sea ice ridges[J]. Cold Regions Science and Technology, 1997, 25(1): 65–77.

[2] Dolgopolov Y, Afanasiev V P, Koren'Kov V A, et al. Effect of hummocked ice on the piers of marine hydraulic structures[C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Ice Problems. Hanover, NH: Dartmouth College, 1975.

[3] Høyland K V, Bjerkås M, Vernyayev S. Mechanical properties of ice ridges and level ice: in-situ and laboratory testing 2003[C]//Proceedings of the 17th International Symposium on Ice. St. Petersburg: IAHR, 2004: 69–75.

[4] Polojärvi A, Tuhkuri J. On modeling cohesive ridge keel punch through tests with a combined finite-discrete element method[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 85: 191–205.

[5] 朱红日, 季顺迎. 冰脊压剪试验及其对直立结构冰载荷的离散元分析[J]. 力学与实践, 2012, 43(2): 234–243.
Zhu H R, Ji S Y. Discrete element analysis of punch through test of ice ridges and its loads on vertical structure[J]. Mechanics in Engineering, 2012, 43(2): 234–243. (in Chinese)

[6] Serré N. Mechanical properties of model ice ridge keels[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 67(3): 89–106.

[7] Zhao W, Leira B J, Høyland K V, et al. A framework for structural analysis of icebreakers during ramming of first-year ice ridges[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(4): 611.

[8] Chai W, Leira B J. Environmental contours based on inverse SORM[J]. Marine Structures, 2018, 60: 34–51.

[9] Chai W, Leira B J, Naess A, et al. Development of environmental contours for first-year ice ridge statistics[J]. Structural Safety, 2020, 87: 101996.

[10] Timco G W, Frederking R M W. Compressive strength of sea ice sheets[J]. Cold Regions Science and Technology, 1990, 17(3): 227–240.

[11] Lunard D S. Frozen ground engineering[M]. Reston, VA: American Society of Civil Engineers (ASCE) Press, 2005.

[12] Leira B J, 柴　威, Radhakrisnan G. 极地船舶结构设计思考[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 212–219.
Leira B J, Chai W, Radhakrisnan G. Structural design considerations for ships operating in arctic regions[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(5): 212–219. (in Chinese)

[13] Strub-klein L, Sudom D. A comprehensive analysis of the morphology of first-year sea ice ridges[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 82: 94–109.

[14] Bian A Q, Chai W, Dong H B, et al. Strength analysis of icebreak ramming sea ice with extreme thickness along the northern sea route[C]//International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2024, 87844: V006T07A017.

[15] 蔡　伟, 朱　凌. 冰碰载荷下船体板弹塑性动力响应分析[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(6): 155–161.
Cai W, Zhu L. Elastic-plastic responses of ship plates under ice impact loading[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(6): 155–161. (in Chinese)

[16] 赵伟栋. 破冰船结构低温疲劳性能与冰致疲劳分析方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
Zhao W D. Research on fatigue performance and ice-induced fatigue analysis method of icebreaker structure at low temperatures [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021. (in Chinese)

[17] DNV. Rules for classification: Ships, Pt. 5 Ch. 1 Sec. 4 vessels for arctic and ice breaking service[S]. Høvik: DNV AS, 2023.