岩礁硬搁浅下船舶冲击载荷与损伤演化

崔　豪[1]，孙树政[1]，杜弘奕[2]，叶亚龙[3]，张　伟[3]，郝晋凯[4]
（1. 哈尔滨工程大学烟台研究院，山东烟台　264000；2. 广船国际有限公司，广州　511462；3. 烟台打捞局技术中心，山东烟台　264001；4. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司，长沙　410021）

摘　要：[目的]针对硬搁浅事故中损伤定量表征不足、速度与角度耦合作用不清以及构件级吸能分配缺乏依据的问题，[方法]以 1 350 箱集装箱船龙辉真实坐礁为对象，基于探摸资料建立“船舶-礁石-流场”耦合有限元模型，对垂向初始速度和前倾角开展参数化分析。[结果]结果表明：当初始速度由 2 m/s 增至 4 m/s 时，水平与垂向搁浅力峰值分别由约 27 MN 增至 55 MN、由约 218 MN 增至 273 MN，且达峰时间提前；外底板首先发生压剪撕裂，载荷随后向纵骨、肋板、纵桁及内底板传递；外底板与船底纵桁为主要吸能构件，吸能占比分别约 31.3%和 23.7%。在相同速度下，前倾角由 10°增至 20°时，水平分量下降而垂向分量上升，但总吸能曲线几乎重合。[结论]研究揭示岩礁硬搁浅条件下冲击载荷传递与损伤演化规律，为抗搁浅结构设计、全事故场景损伤建模及救捞强度校核提供依据。

关键词：硬搁浅；搁浅力；吸能分配；损伤变形
中图分类号：U661.4　　**文献标志码：**A　　【DOI】10.13788/j.cnki.cbgc.2026.09.03

Impact Load and Damage Evolution of Ship Under Hard Grounding of Rock Reefs

CUI Hao[1], SUN Shuzheng[1], DU Hongyi[2], YE Yalong[3], ZHANG Wei[3], HAO Jinkai[4]
(1. Yantai Research Institute, Harbin Engineering University, Yantai 264000, Shandong, China; 2. Guangzhou Shipyard International Co., Ltd., Guangzhou 511462, China; 3. Technology Center Department, Yantai Salvage, Yantai 264001, Shandong, China; 4. PowerChina Zhongnan Engineering Co., Ltd., Changsha 410021, China)

Abstract: [Purpose] To address the insufficient quantitative characterization of damage in hard-grounding accidents, the unclear coupling effects of speed and trim angle, and the lack of a sound basis for component-level energy absorption allocation, [Method] the real reef-grounding accident of the 1 350 TEU containership Longhui is investigated. Based on site survey data, a coupled finite element model of the ship-reef-fluid system is established, and a parametric analysis is conducted with respect to vertical initial impact velocity and bow-down trim angle. [Result] The results show that, as the initial velocity increased from 2 m/s to 4 m/s, the peak horizontal and vertical grounding forces rose from approximately 27 MN to 55 MN and from approximately 218 MN to 273 MN, respectively, while the time to peak decreased. Compressive-shear tearing initiated in the outer bottom plating, after which the load is progressively transferred to the longitudinal stiffeners, transverse floors, longitudinal girders, and inner bottom plating. The outer bottom plating and bottom longitudinal girders are identified as the primary energy-absorbing components, accounting for approximately 31.3% and 23.7% of the absorbed energy, respectively. At the same velocity, when the bow-down trim angle increased from 10° to 20°, the horizontal force component decreased whereas the vertical force component increased, while the total energy-absorption curves remained nearly coincident. [Conclusion] The findings clarify the mechanisms of

收稿日期：2025-07-10；**修回日期：**2025-08-22；**录用日期：**2025-10-15
基金项目：烟台市重大科技创新工程（2023ZDCX020）
作者简介：崔豪（2001—），男，硕士研究生。研究方向：船舶与海洋工程结构力学与水动力学。

impact-load transfer and damage evolution under hard grounding on rocky reefs, and provides a basis for anti-grounding structural design, full-accident-scenario damage modeling, and salvage strength assessment.

Key words: hard grounding; grounding force; energy absorption distribution; damage deformation

0 引言

与其他救捞作业相比，搁浅救捞多发生在多岛礁或浅滩等浅水区，海底地形复杂。搁浅属于典型的高能冲击问题；当搁浅力过大时，船底与坚硬礁石剧烈接触，易导致结构破损并削弱整体强度。与此同时，船体破损后燃油外泄会对海洋环境造成严重威胁。因此，系统研究硬搁浅条件下冲击载荷对船底结构的影响，具有重要的工程实践价值与指导意义。

BUZANCIC等[1]基于搁浅碰撞事故统计，构建涵盖破损情形的船体结构可靠性评估模型，采用概率方法处理不确定性，并以失效概率量化不同损伤状态下的可靠性。ZENG等[2]、PINEAU等[3]针对船底与锥形、椭圆抛物面礁石碰撞引起的受压变形，提出基于塑性极限分析的简化方法，用于判定底板的主要失效模式。PINEAU等[4]面向椭圆抛物面岩石上的倾斜接地，基于塑性极限分析给出简化解析法，并推导了接地条件下底板与横向构件的抗力计算式。LIU等[5]通过倾斜加筋板穿透试验与数值模拟研究船体碰撞行为，提出圆形网格模型（Circular Mesh Model, CMM），并揭示了承载力与冲击角之间的关系。ZHOU等[6]开展多岩石搁浅的水槽模型试验，考察岩石分布与初始相对高度等因素对搁浅过程的影响，分析岩石数量对结构动态响应的作用，为多岩石接地的动力响应研究提供了初步证据。

现有研究多聚焦于搁浅力学机理的深化阐释，例如采用非线性有限元开展材料失效与动力响应分析，并涉及多岩石接地的动力损伤。然而，对搁浅过程中的载荷分析及其对整船结构安全性的系统评估仍相对不足。为弥补上述空白，本文以1 350箱集装箱船龙辉的真实坐礁事故为对象，基于救捞作业探摸报告，利用HyperMesh构建坐底搁浅船舶-礁石-流场耦合有限元模型，并在ABAQUS中开展非线性仿真，量化不同因素下礁石-船体间的冲击载荷与结构响应。研究输出搁浅事故下的损伤模型，为救捞作业计算提供全事故场景的损伤演化依据，为救捞方案制定及安全评估提供理论依据与方法支撑。

1 基本参数设定

1.1 船舶参数

本文进行搁浅分析的对象是1 350箱集装箱船龙辉，该船于2021年1月7日因气候影响搁浅于西霞口船厂内礁石上，见图1，图2以简化模型说明该船搁浅所造成的船底部板材破坏。该船的主要参数见表1。



图 1 搁浅时的龙辉轮

Fig. 1 Longhui During Grounding

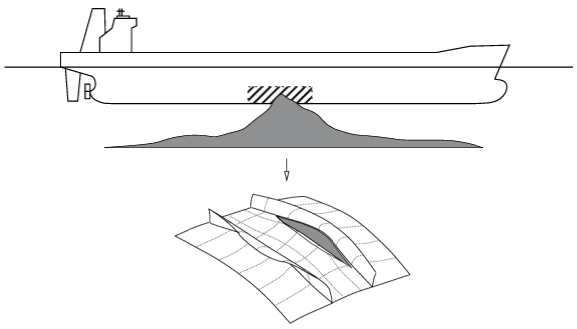


图 2 龙辉轮搁浅简化模型示意图

Fig. 2 Simplified Grounding Model of Longhui

表 1 船舶主要参数

Tab. 1 Principal Particulars of the Ship

参数	数值
船长/m	161.3
型宽/m	25
型深/m	14.9
吃水/m	8.5
肋骨间距/m	3.2
满载质量/t	16 162

1.2 环境参数

为进行与实际相符的数值模拟，应将流场对船体的影响考虑其中，该区域流场材料参数见表2。

表 2 流场材料参数

Tab. 2 Material Parameters of the Fluid domain

材料参数		数值
密度 ρ_0/(kg/m^3)		1 000
声速 c_0/(m/s)		1 484
黏度 μ/(Pa·s)		0.001
状态方程系数	s	1.979
	Γ_0	0.11

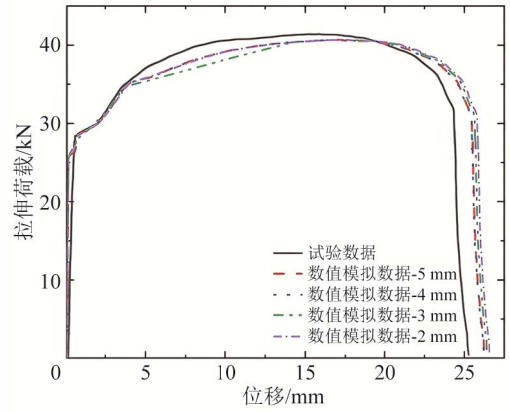
1.3 材料与本构参数

船体结构材料为AH32钢，弹性模量为206 GPa，

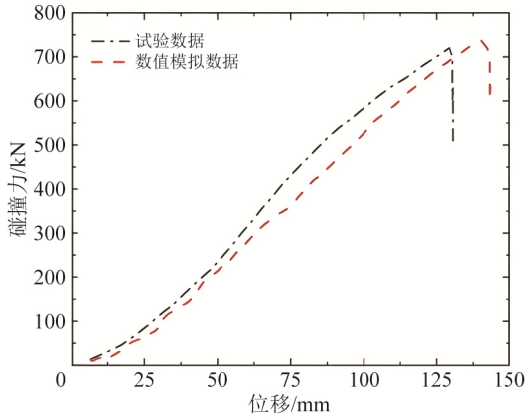
泊松比为0.30，屈服强度为322 MPa，船底基于细化区域网格长度定义的失效应变取0.35。礁石在模型中等效为固定刚性圆锥，采用刚体单元离散并施加刚性约束，不考虑其弹塑性变形。流场采用欧拉域水体模型以表征附加水体质量和局部流体约束，水体密度、声速、黏度及状态方程参数见表2。

1.4 本构模型验证

为说明AH32钢本构参数的选取依据，前期研究已基于单轴拉伸试验和15°倾斜准静态穿透试验对该材料模型进行了验证，结果见图3。图3中，单轴拉伸算例建立了2 mm、3 mm、4 mm和5 mm共4组不同网格尺寸的有限元模型，边界条件与试验一致，左端固支，右端施加100 mm/s位移载荷；倾斜穿透算例选取15°倾斜加筋板试件，采用解析刚体压头沿板法向施加180 mm位移，加载速度为100 mm/s。



(a) 单轴拉伸载荷-位移曲线对比



(b) 穿透接触力-位移曲线对比

图 3 本构模型验证结果

Fig. 3 Validation Results of the Constitutive Model

验证结果表明，不同网格尺寸下的单轴拉伸载荷-位移曲线与试验曲线在弹性阶段基本重合，峰值及峰后软化段趋势一致，说明所采用的硬化模型与失效准则具有较好的有效性和网格稳定性。进一步采用15°倾斜加筋板准静态穿透试验进行校核，仿真接触力-位移曲线与试验值在峰值和整体变化趋势上吻合较好，在峰后下降段略微平缓，能够合理反映AH32钢在局部穿透过程中的损伤响应。

2 模型的建立

2.1 搁浅场景描述

由于龙辉轮搁浅区域不同位置处的礁石形状各异，难以精细地通过模型量化，故本文基于实际的探摸报告中礁石到船底的距离和破口半径，对礁石进行一定的简化，礁石模型见图4，礁石简化为底部圆周直径为8 m，高为4 m的圆锥。搁浅过程中，流场对船体产生的影响同样不可忽视，然而，在进行动力分析时，流场通常难以考虑，故此，在开展船舶碰撞损伤机理研究时，通常利用附加水质量法[7]或耦合的欧拉-拉格朗日方法模拟流场影响[8]，建立典型的搁浅场景以研究船体结构破坏模式[912]。经过实际探摸后，发现龙辉轮的破损情况严重，其中3#舱后舱、4#舱受到礁石的严重破坏，甚至出现破洞直径1 m及长裂缝长度6 m～7 m；相比之下，3#舱前舱较为完好。

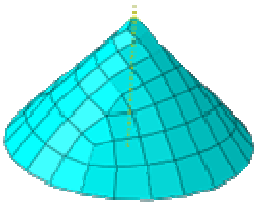


图 4 礁石模型

Fig. 4 Rock model

2.2 船舶坐底搁浅模型

根据探摸报告，本文选取龙辉轮中部搁浅段为研究对象，开展坐底搁浅分析。研究重点为底部结构在礁石作用下的动态损伤、冲击荷载及吸能分配，并为救捞工作基于全事故场景的损伤模型的建立提供参考。为减小舱段与整船转动惯量差异对变形判定的影响，冲击建模中对不规则礁石作工程化简化处理，并将礁石视为固定刚体，以降低计算复杂度；且考虑到现场探摸后礁石以硬质岩体为主，碰撞过程中礁石变形与吸能相较船底塑性变形可忽略，因此采用刚体礁石假设获得船体损伤结果。

基于以上说明与假设，龙辉轮的坐礁场景示意以及对应的船舶坐底搁浅数值模型分别见图5和图6。在数值模型中，通过定义通用接触模拟舱段结构、礁石以及流场三者之间的相互作用，基于库仑摩擦定律，切向摩擦因数为0.3，法向设置为硬接触。为贴近实际场景，流场边界设置为：四周为对称约束，底部为刚性约束，顶部自由；礁石采用刚性约束，而舱段结构不施加任何约束。

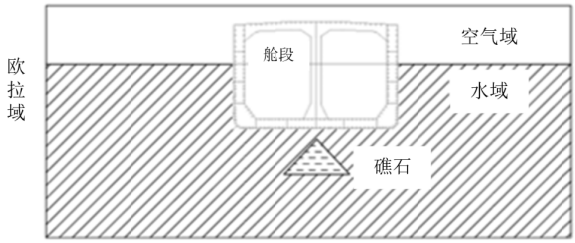
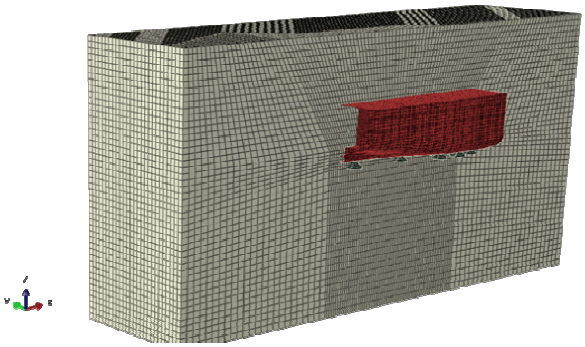
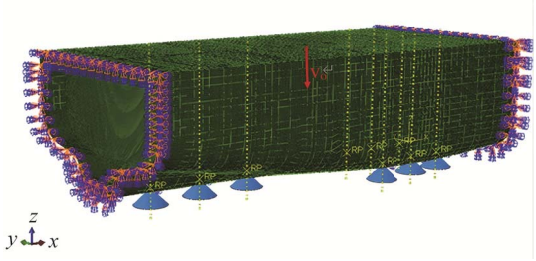


图 5　坐礁场景示意

Fig. 5　Schematic of the Grounding Scenario



(a)　隐去一半流体网格的整体场景数值模型



(b)　舱段数值模型

图 6　船舶坐底搁浅数值模型

Fig. 6　Numerical Model of Ship Grounding on a Reef

2.3　有限元离散与耦合求解设置

计算采用ABAQUS瞬态求解，总计算时间取2.0s。船体与礁石采用拉格朗日描述，流场采用欧拉描述，流固耦合采用欧拉-拉格朗日耦合方法，通过通用接触实现船体外表面与流场之间的动量交换；礁石与船体之间采用硬接触+库仑摩擦，摩擦因数取0.3。

为减弱边界反射对局部冲击区的影响，流场在*X*、*Y*、*Z*方向分别取舱段特征尺寸的3倍、2倍和3倍。利用HyperMesh采用4节点缩减积分板壳单元（S4R）和梁单元（B31）建立船舶模型，舱段结构单元尺度为0.2 m；礁石采用刚性四边形单元（R3D4），网格尺度约为0.5 m；流场设为欧拉体，采用六面体缩减积分体单元（C3D8R），船体附近流场网格细化至0.8 m，外场渐粗过渡。船体材料模型已通过拉伸与穿透算例完成网格敏感性校核；流场网格主要用于表征附加水体质量和局部流体约束，故本文重点给出流场范围、单元类型与细化尺度，不再单独展开流场网格无关性讨论。

3　工况设置

受落潮影响，龙辉轮发生高位搁浅。碰撞瞬间的初始搁浅速度无法直接接获取，而该速度是决定初始动能的计算基准。鉴于在碰撞发生时，冲击荷载通常不垂直于船底板，故还应考虑前倾角的存在。并且，当前倾角度发生变化时，船舶搁浅所受荷载的水平与垂向分量将重新分配，进而影响搁浅力的峰值大小和出现时刻。为探究初始搁浅速度和搁浅角度对船舶结构响应的影响，进行了表3的工况设置，其中共设置6个瞬态工况：V_1～V_3分别对应V_0=2 m/s、3 m/s和4 m/s且前倾角为15°；A_1～A_3分别对应前倾角为10°、15°、20°且V_0=2 m/s。各工况总计算时长均为2.0 s。其中，初始搁浅速度v_0为垂向分量，沿全局-*Z*负向施加，即船体在垂向向下压向礁石，见图6(b)。

表 3　工况设置

Tab. 3　Simulation Cases

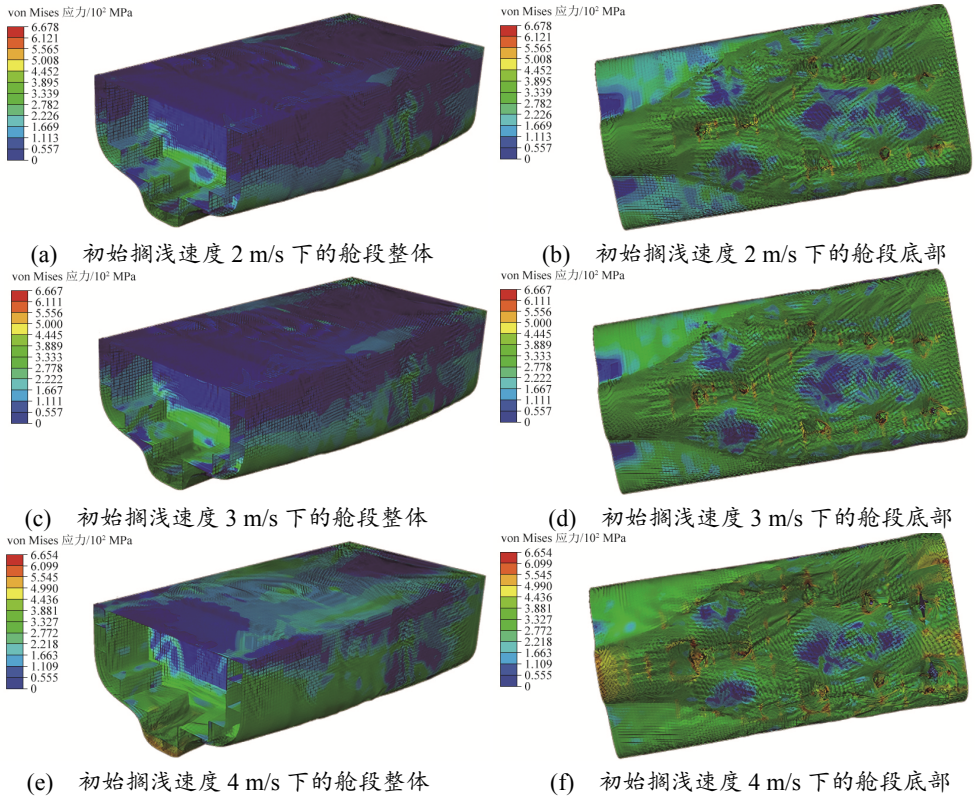
分析类型	速度分析			角度分析		
工况	V_1	V_2	V_3	A_1	A_2	A_3
初始搁浅速度 v_0/(m/s)	2	3	4	2	2	2
搁浅角度 θ/(°)	15	15	15	10	15	20

4　船舶搁浅分析

4.1　船舶搁浅速度

4.1.1　损伤变形分析

在上述工况下进行数值模拟，聚焦船底板纵骨的断裂变形，和双层底结构的压溃变形，图7～图9均为变形后结构的von Mises应力云图。图7和图8展示不同垂向初始搁浅速度下，坐底搁浅后舱段的变形形态。从图7和图8中可知，受局部受力不均的影响，塑性变形呈显著局部化；撕裂自礁石贯入区域，危险区主要位于礁石贯入中心及相邻构件根部，高应力区由中心向周向逐渐衰减，即应力集中区域由礁石几何中心向外扩展，并沿周向逐渐衰减。在贯入深度一致的条件下，随着垂向初始速度由2 m/s增至4 m/s，外底板与内底板的局部凹陷和撕裂均明显加剧，船底平均等效应力同步升高，损伤变形愈加严重。



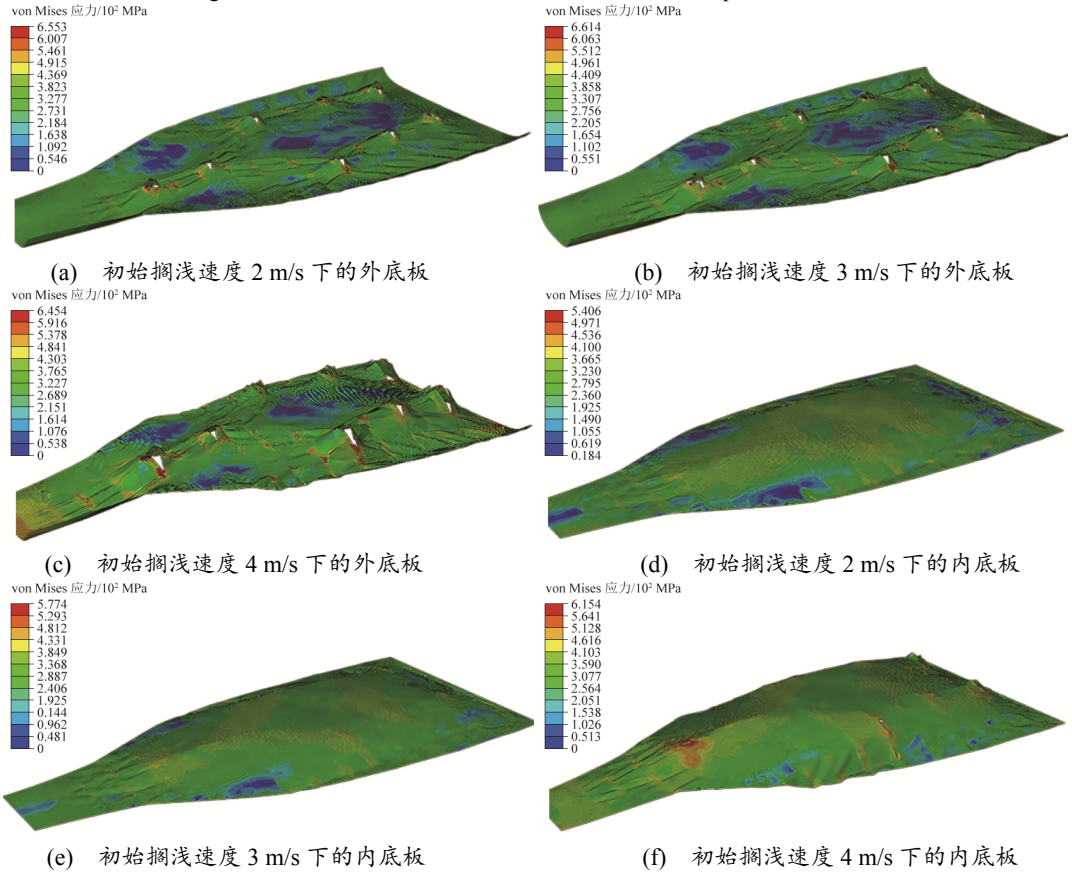
(a)　初始搁浅速度 2 m/s 下的舱段整体　　(b)　初始搁浅速度 2 m/s 下的舱段底部

(c)　初始搁浅速度 3 m/s 下的舱段整体　　(d)　初始搁浅速度 3 m/s 下的舱段底部

(e)　初始搁浅速度 4 m/s 下的舱段整体　　(f)　初始搁浅速度 4 m/s 下的舱段底部

图 7　舱段整体 von Mises 应力云图

Fig. 7　Overall Von Mises Stress Contours of the Compartment Model



(a)　初始搁浅速度 2 m/s 下的外底板　　(b)　初始搁浅速度 3 m/s 下的外底板

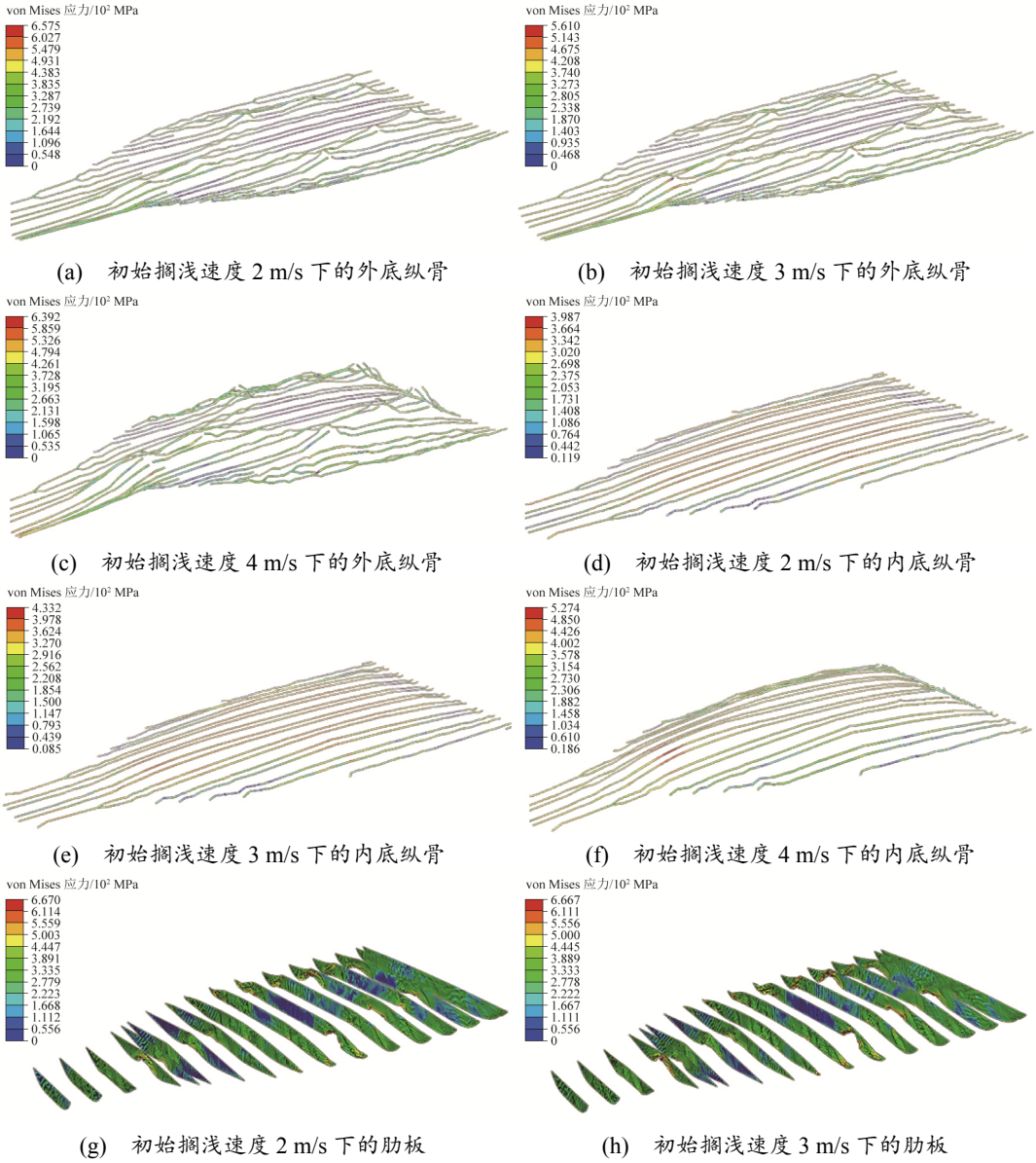
(c)　初始搁浅速度 4 m/s 下的外底板　　(d)　初始搁浅速度 2 m/s 下的内底板

(e)　初始搁浅速度 3 m/s 下的内底板　　(f)　初始搁浅速度 4 m/s 下的内底板

图 8　主要结构 von Mises 应力云图

Fig. 8　Von Mises Stress Contours of the Main Structures

图9展示不同初始搁浅速度下双层底关键构件的损伤形态。总体来看，损伤主要集中于礁石接触及贯入区域，其分布轮廓与锥形礁石几何外形具有较好对应关系，表明局部接触条件对损伤模式具有主导作用。从构件破坏特征看，完全断裂主要发生在外底板贯入中心及相邻外底纵骨根部，其失效机理可归结为锥形礁石诱发的局部压剪-撕裂复合作用；内底板、肋板与纵桁则主要表现为塑性凹陷、弯曲及局部屈服，尚未形成贯穿断裂。外底板与内底板的破坏模式总体相近，均体现为局部压陷和随接触发展产生的变形扩展，但由于外底板直接与礁石接触，承受更高的冲击载荷与切向摩擦作用，其撕裂破坏更为显著；相比之下，内底板所受直接冲击较弱，应力传递更趋缓和，因此整体损伤程度较轻。就骨架构件而言，外底纵骨承担船底纵向支撑功能，在礁石局部顶撑和冲击作用下易发生应力集中，表现为局部屈曲、弯曲甚至折断；肋板主要提供横向加劲，损伤形式以扭曲和横向凹陷为主；纵桁则发挥船底纵向抗弯的重要作用，当底部支撑条件因坐礁而发生突变时，结构纵向弯矩重新分布，进而诱发纵桁弯曲变形。由此可见，岩礁硬搁浅工况下船底结构损伤具有明显的层次性与传递性，即外底板首先发生局部破坏，随后损伤向骨架构件及内底板扩展。



(a) 初始搁浅速度 2 m/s 下的外底纵骨　(b) 初始搁浅速度 3 m/s 下的外底纵骨

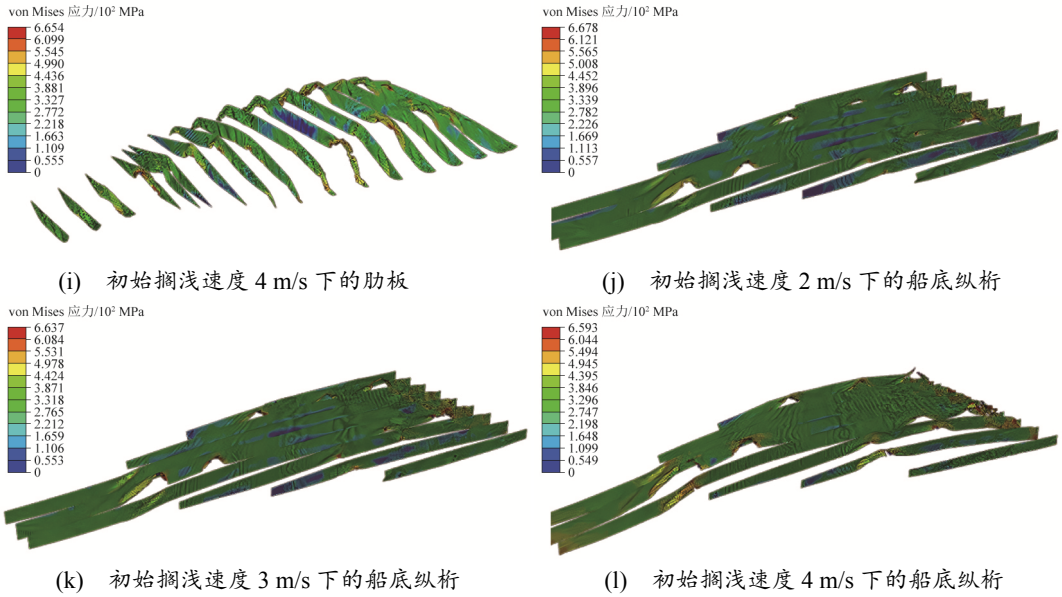
(c) 初始搁浅速度 4 m/s 下的外底纵骨　(d) 初始搁浅速度 2 m/s 下的内底纵骨

(e) 初始搁浅速度 3 m/s 下的内底纵骨　(f) 初始搁浅速度 4 m/s 下的内底纵骨

(g) 初始搁浅速度 2 m/s 下的肋板　(h) 初始搁浅速度 3 m/s 下的肋板

图 9　局部结构 von Mises 应力云图

Fig. 9　von Mises Stress Contours of the Local Structures



(i)　初始搁浅速度 4 m/s 下的肋板　　(j)　初始搁浅速度 2 m/s 下的船底纵桁

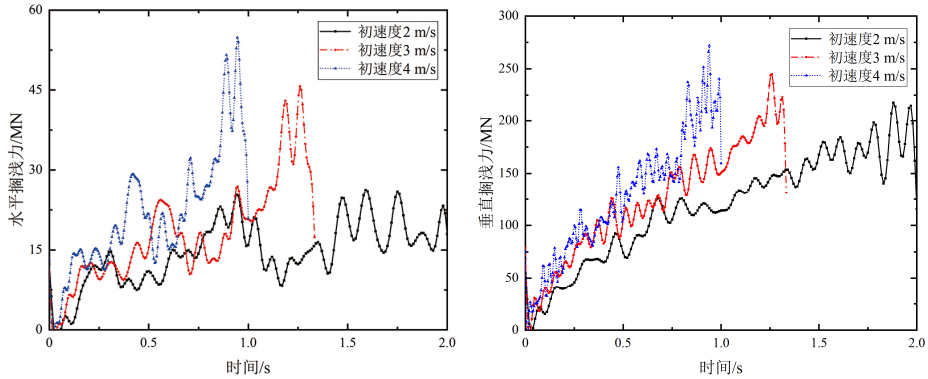
(k)　初始搁浅速度 3 m/s 下的船底纵桁　　(l)　初始搁浅速度 4 m/s 下的船底纵桁

图 9　局部结构 von Mises 应力云图（续）

Fig. 9　von Mises Stress Contours of the Local Structures (Continued)

4.1.2　搁浅力分析

图10展示在15°前倾角下，不同垂向初始速度v_0的水平方向与垂向搁浅力时程，其中搁浅力通过提取刚性礁石参考点约束反力获得。在15°前倾角下，v_0=2 m/s、3 m/s和4 m/s工况对应的水平搁浅力峰值约为26.5 MN、45.5 MN和54.8 MN，垂向搁浅力峰值约为218 MN、245 MN和273 MN；对应达峰时刻分别约为1.54 s、1.26 s、0.96 s和1.96 s、1.28 s、0.93 s。总体上，垂向分量显著大于水平分量，且两者随v_0增大均表现出峰值与波动幅值的同步增大。受前倾姿态的影响，载荷分量在水平和垂向方向上重新分配，反映了法向接触为主、切向摩擦为辅的受力特征。值得注意的是，力时程的主振荡频率随速度变化不大，表明频率主要由船底结构的固有特性决定，而速度主要通过提高激励强度与动态放大系数来抬升幅值。



(a)　水平方向　　(b)　垂直方向

图 10　不同速度下水平方向与垂直方向搁浅力对比

Fig. 10　Comparison of Horizontal and Vertical Grounding Forces at Different Initial Velocities

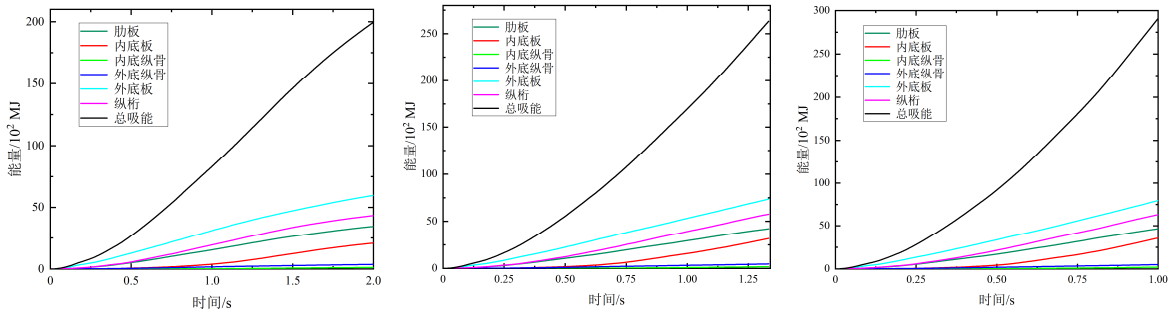
从图10中还可知，搁浅载荷呈现分段增长，这是由于外底板首先接触并在尖锐锥顶处发生局部撕裂，随后载荷向底板纵骨、肋板与纵桁等骨架构件转移，接触面积扩大与等效刚度突变共同触发新的载荷突变；在持续作用下，载荷进一步传递至内底板，内底板吸收能量发生塑性变形，对肋板的变形起到一定缓冲作用。图10中水平方向搁浅力先增大后减小，主要与外底板穿孔后接触由面接触逐步转为边/点接触有关，切向约束减弱并伴随滑移释放；且随v_0增大，内底板越早缓冲，峰值出现的时间也发生了变化，延迟了下一个肋板的失效和损伤，而低速工况在前期与高速工况曲线较为接近，随后才因动能输入与贯入速率差异而迅速分离，这是由于较大的v_0工况更早发生外底撕裂和承载路径转移，

而较低速的工况贯入与载荷传递过程更缓慢，峰值时刻后移。另一方面，水平搁浅力明显低于按摩擦因数与垂向力简单估计的上限，揭示出接触面存在不均匀滑移与未充分发展的极限摩擦状态。

4.1.3 吸能特性分析

不同搁浅速度下各构件的吸能-时间关系曲线和吸能比例见图11，随垂向初始速度增大，总吸能与各构件吸能同步上升，高速工况的曲线提前终止，与前述搁浅力的变化规律相似。由图读数可得，V_1～V_3工况的总吸能终值约为2.00×10^4 MJ、2.63×10^4 MJ和2.98×10^4 MJ（图11中纵轴以10^2 MJ计）。另外，各构件呈现一致的变化趋势：初期接触与弹性阶段吸能缓慢；进入塑性阶段后，随着接触面积扩大与相对速度提高，吸能速率上升，曲线斜率增大；当局部构件失效时，因结构破坏致搁浅速度下降、有效接触面积减小，曲线逐渐趋于平缓。其中内底板因与礁石接触较晚而起势滞后，且由于前期搁浅动能已由较外部的构件吸收，其吸能幅值略低。

就能量分配而言，在搁浅过程中，外底板和船底纵桁为主要的吸能构件，分别约占总吸能量的31.3%和23.7%；而外底纵骨、肋板和内底板亦有显著贡献。这一能量分布特征与搁浅场景（如碰撞角度、底质硬度）直接相关，可为船舶抗搁浅结构优化设计提供依据。



(a) 2 m/s　(b) 3 m/s　(c) 4 m/s

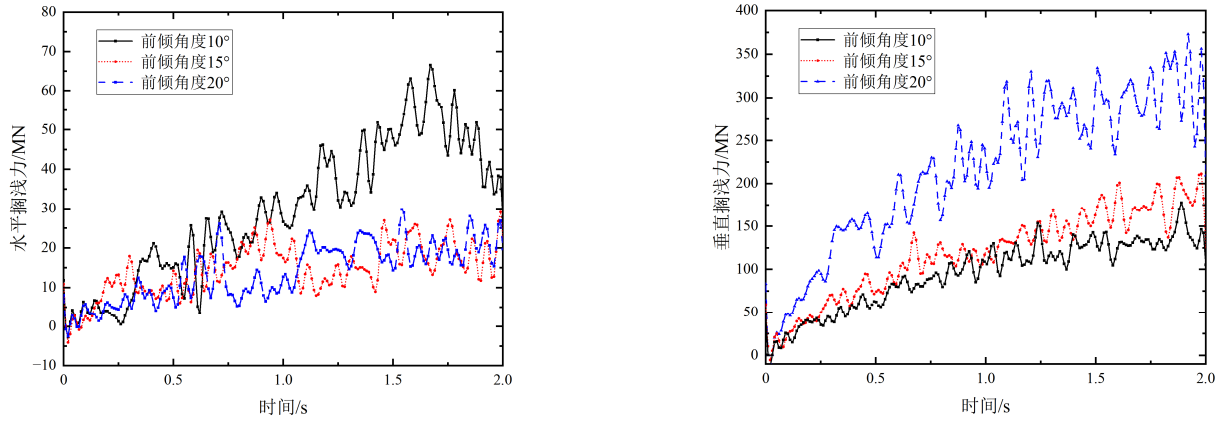
图 11 不同搁浅速度各构件吸能曲线

Fig. 11 Energy-Absorption Curves of Individual Components at Different Grounding Velocities

4.2 船舶搁浅角度

4.2.1 搁浅力分析

仿真结果见图12，船体搁浅过程中前倾角度的变化对搁浅力的分布产生显著影响。在相同初始搁浅速度下，随着船舶前倾角由10°增至20°，水平搁浅力峰值约由67 MN降至30 MN，而垂向搁浅力峰值约由175 MN增至375 MN，水平分量整体下移并趋于平台，而垂向分量显著抬升，峰值与曲线斜率均增加。该趋势的出现源于力学分解原理及接触几何的耦合作用，前倾角的增大使船体与海床接触面的法向分量增加，切向分量减小，从而导致法向反力得到放大，切向分量则被削弱。此外，前倾角度的增大可能改变接触区域的应力分布，进一步加剧垂向力的增长，同时减少水平力的传递效率。上述结果表明，前倾角对法向、切向分配具有决定性影响，故应在救捞强度校核中作为关键参数进行约束与敏感性评估。



(a) 水平方向　(b) 垂直方向

图 12 不同角度下水平方向与垂直方向搁浅力对比

Fig. 12 Comparison of Horizontal and Vertical Grounding Forces at Different Bow-Down Trim Angles

4.2.2 吸能特性分析

在小前倾角范围且初始搁浅速度一致的条件下发生坐底搁浅，根据图13，A_1～A_3工况总吸能曲线呈现渐进式上升的趋势且几乎重合，仅在约1 s之后出现轻微分叉。尽管前倾角的变化改变了结构变形模式，且影响了载荷传递的空间分布，但由于船舶结构的塑性变形能主要来源于动能转化，而前倾角的变化对系统做功总量与能量转换关系几乎没有影响。因此，船舶搁浅时，在小前倾角范围内，能量吸收规模主要仍由初始速度控制，而前倾角更多体现为载荷分配和局部损伤模式的调整。

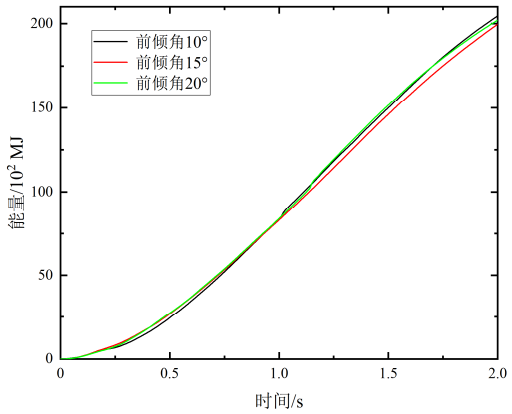


图 13　2 m/s 搁浅速度下不同前倾角总吸能曲线

Fig. 13　Total Energy-Absorption Curves at Different Bow-Down Trim Angles for an Initial Grounding Velocity of 2 m/s

5　结论

本文基于探摸资料通过HyperMesh与Abaqus软件建立了船舶-礁石-流场耦合有限元模型，以龙辉轮真实坐礁为案例，系统开展了不同初始垂向速度与小前倾角条件下的损伤变形、搁浅力与吸能响应研究，以模拟实际搁浅时受到的冲击荷载与损伤变形为基础，揭示了船舶搁浅的损伤演化规律，为抗搁浅结构优化、救捞方案制定及安全评估提供了理论依据与方法支撑。通过上述分析，可得到3个主要结论：

1）船舶在搁浅过程中，危险区主要位于礁石贯入中心及相邻构件根部，完全断裂主要出现在外底板贯入中心及外底纵骨根部，失效机理为局部压剪-撕裂；内底板、肋板与纵桁主要表现为塑性凹陷、弯曲及局部屈服。随着初始速度由2 m/s增至4 m/s，高应力区范围和断裂区均扩大，底部平均应力与损伤程度同步增加。

2）在15°前倾角下，V_1～V_3工况的水平搁浅力峰值约为26.5 MN、45.5 MN和54.8 MN，垂向搁浅力峰值约为218 MN、245 MN和273 MN，且达峰时间整体前移；搁浅力通过礁石参考点反力提取，受力以法向接触为主、切向摩擦为辅。外底板与船底纵桁为主要吸能构件，吸能占比分别约31.3%和23.7%，总吸能终值随速度增大而升高。

3）在相同初始速度下，当前倾角由10°增至20°时（A_1～A_3工况），水平搁浅力峰值约由67 MN降至30 MN，垂向搁浅力峰值约由175 MN增至375 MN；但总吸能曲线几乎重合。说明小前倾角主要改变法向与切向载荷分配与局部受力路径，对系统总能量耗散几乎无影响，吸能规模主要由初始搁浅速度控制。

参考文献：

[1] BUZANCIC P B, PARUNOV J, GUEDES S C. Structural Reliability Analysis of Ship Hulls Accounting for Collision or Grounding Damage[J]. Journal of Marine Science and Application, 2020, 19(4): 717-733.

[2] ZENG J, HU Z, CHEN G. A Steady-State Plate Tearing Model for Ship Grounding Over a Cone-Shaped Rock[J]. Ships and Offshore Structures, 2016, 11(3): 245-257.

[3] PINEAU J P, LE S H. Analytical Modelling of Ship Bottom Grounding Considering Combined Surge and Heave Motions[J]. Marine Structures, 2023, 88: 103364.

[4] PINEAU J P, LE S H, SOULHI Z. Rapid Assessment of Ship Raking Grounding on Elliptic Paraboloid Shaped Rock[J]. Ships and Offshore Structures, 2021, 16(Suppl. 1): 106-121.

[5] LIU F, HU Y, FENG G, et al. Experimental and Numerical Study on the Penetration of the Inclined Stiffened Plate[J]. Ocean Engineering, 2022, 258: 111792.

[6] ZHOU Z, ZHU L, LIANG Q. Dynamic Responses and Damage of a Model Ship in Multi-Rock Grounding[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(11): 1908.

[7] 张怀跃. 双壳油船碰撞损伤机理分析及图谱绘制[D]. 杭州: 浙江海洋大学, 2016.
ZHANG H Y. Analysis of Collision Damage Mechanisms and Damage Atlas Development for Double-Hull Oil Tankers[D]. Hangzhou: Zhejiang Ocean University, 2016.

[8] 刘昆, 王自力, 张延昌, 等. 基于全耦合技术的船体结构碰撞性能研究[J]. 船舶力学, 2015, 19(5): 574-581.
LIU K, WANG Z L, ZHANG Y C, et al. Study on the Collision Performance of Ship Structures Based on Fully Coupled Technology[J]. Journal of Ship Mechanics, 2015, 19(5): 574-581.

[9] 朱琳, 费宝祥, 王秀飞, 等. 坠物事故下典型舱段结

构动态响应数值仿真分析[C]//中国造船工程学会船舶力学学术委员会. 2018.
ZHU L, FEI B X, WANG X F, et al. Numerical Simulation of the Dynamic Response of a Typical Ship Compartment Under a Falling-Object Accident[C]//Ship Mechanics Academic Committee of the Chinese Society of Naval Architects and Marine Engineers. 2018.

[10] 刘楚豪, 刘昆, 刘赫崴, 等. 落锤碰撞载荷下船体板架结构动态力学性能[J]. 船舶工程, 2024, 46(增刊 1): 432-440.
LIU C H, LIU K, LIU H W, et al. Dynamic Mechanical Behavior of Ship Grillage Structures Under Drop-Weight Impact Loading[J]. Ship Engineering, 2024, 46(Suppl. 1): 432-440.

[11] 俞同强, 刘昆, 杨毅, 等. 考虑弹塑性土体作用的船舶搁浅损伤特性研究[J]. 船舶工程, 2016, 38(5): 9-14.
YU T Q, LIU K, YANG Y, et al. Study on Ship Grounding Damage Characteristics Considering the Effect of Elastoplastic Soil[J]. Ship Engineering, 2016, 38(5): 9-14.

[12] 刘昆. 计及材料动态非线性的船舶搁浅损伤特性及搁浅后剩余强度评估研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
LIU K. Study on Ship Grounding Damage Characteristics and Post-Grounding Residual Strength Assessment Considering Dynamic Material Nonlinearity [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.

（上接第 12 页）

[7] HUANG Q, YAN X, WANG Y, et al. Numerical Modeling and Experimental Analysis on Coupled Torsional-Longitudinal Vibrations of a Ship's Propeller Shaft[J]. Ocean Engineering, 2017, 136: 272-282.

[8] ZHANG X, LI Y, WANG H, et al. Dynamic Response Characteristics of Propulsion Shaft System with Shaft Generator[J]. Applied Sciences, 2024, 14(15): 6769.

[9] 庄同心, 黄千稳. 基于轴承倾角的轴系弯扭耦合振动特性分析[J]. 船舶工程, 2025, 47(8): 77-83.
ZHUANG T X, HUANG Q W. Analysis on Bending-Torsional Coupled Vibration Characteristics of Shafting Based on Bearing Inclination Angle[J]. Ship Engineering, 2025, 47(8): 77-83.

（上接第 20 页）

[14] 王金炜, 宋金鹏, 罗文, 等. 夹芯复合材料A级防火结构设计和优化[J]. 材料开发与应用, 2019, 34(5): 40-44.
WANG J W, SONG J P, LUO W, et al. Design and Optimization of A-Level Fireproof Structure of Sandwich Composite[J]. Material Development and Application, 2019, 34(5): 40-44.

[15] 朱况基, 罗柽, 张延松, 等. 基于新型碰钉结构的复合材料甲板防火结构传热性能建模与分析[J]. 机械设计与研究, 2024, 40(4): 235-240.
ZHU K J, LUO C, ZHANG Y S, et al. Heat Transfer Performance Modeling and Analysis of Composite Deck Fireproof Structure Based on New Nail Structure[J]. Machine Design and Research, 2024, 40(4): 235-240.

[16] 张子威, 严仁军. 火灾下玻璃纤维复合材料夹芯板防火隔热性能研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2024, 48(4): 286-291.
ZHANG Z W, YAN R J. Study on Fire and Heat Insulation Performance of Glass Fiber Reinforced Composite Sandwich Panel Under Fire[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2024, 48(4): 286-291.

[17] 陈国涛, 梅志远, 周振龙, 等. 船用复合材料泡沫夹层结构耐火分隔特性研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2026, 54(4): 59-65.
CHEN G T, MEI Z Y, ZHOU Z L, et al. Research on the Fire-Resistant Partitioning Characteristics of Marine Composite Foam Sandwich Structures[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2026, 54(4): 59-65.