

# 碎冰连续碰撞下船舶损伤模式研究

韩文栋, 白 帅, 王金锋, 赵晓东, 鲁明骅, 崔 健

(山东省青岛船舶技术服务中心 日照分中心, 山东 日照 276800)

**摘 要:**针对航行于碎冰水域的船舶航行速度、碎冰尺寸对船舶结构进行小能量多次碰撞的影响机理研究,并通过数值仿真模拟航行在碎冰水域环境中发生的船-冰碰撞情况。利用控制变量法,定量研究船舶在航速、碰撞次数、碎冰尺寸等参数下的船舶动态结构响应特性,进一步揭示船舶在不同碰撞工况下其自身损伤变形的规律特性,得到船舶在不同航速、碎冰尺寸等情况下碎冰与船舶多次碰撞下的损伤模式。

**关键词:**碎冰;小能量;多次碰撞;累积损伤

**中图分类号:**U672.7

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-9891(2021)1-0046-03

## 0 引言

随着两极冰川融化,航运业向两极扩展成为趋势。在极地航行水域有较多浮冰,船舶与浮冰碰撞概率相对较大,连续多次的碰撞对船舶产生的累积损伤事关船舶安全。因此,本文对航行于冰区的船舶在碎冰区域船-冰碰撞过程中船体累积损伤破坏模式的研究,将为极地船舶的设计提供必要的依据,为极地船舶航运发展及船舶航行提供安全保障。

目前,国内外已有很多学者对碎冰区碎冰分布及碎冰区航行船舶阻力进行研究。关于波罗的海航区的碎冰问题,早在 1979 年 Tuovinen 就开始了研究,发现其日常呈现的尺寸符合对数正态概率分布函数的性质。<sup>[1][101-103]</sup>通过数值仿真的方式, Kim MC 等建立了两艘不同的冰区货船船艏模型,通过 LS-DYNA 软件进行数值仿真研究,发现其阻力模拟值均高于实验值。<sup>[2]</sup>李紫麟通过数值模拟了海冰-船体之间的相互作用力并通过计算得出船体受到的总冰力数值大小。<sup>[3]</sup>李夏炎基于三种碎冰密度下的六个不同速度点,采用模型试验和有限元数值仿真两种方法,对碎冰区域内航行的船舶的阻力数据进行了测量。<sup>[4]</sup>国威等人采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,简称“CFD”)和离散单元法(Discrete Element Method,简称“DEM”)方法,通过浮力和拖曳力模型模拟流体和碎冰,得到船体与冰力、航速、碎冰厚度的关系。<sup>[5]</sup>刘为民等人按照真实的分布规律,基于 Glapago,采用 Grasshopper 参数进行优化设计,建立了符合自然实际环境的模型。<sup>[6]</sup>

## 1 有限元模拟

### 1.1 有限元模型建立

本文基于一艘 IMO II 型无限航区的双底双壳、球鼻艏型成品油船建立船体数值仿真模型。该船共设有 12 个液舱,载货量为 13 200 t,考虑到船-冰碰撞过程中存在的“沙漏”能,为了更好地运用冰体材料的塑性准则,并实现根据塑性应变定义冰体材料失效的目的,以便在材料模型中建立相应的应力应变曲线,本文选择 LS-DYNA 材料库中的 24 号冰材料,其相关参数如表 1 所示,其应力应变-曲线如图 1 所示。

表 1 冰材料参数

材料属性	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	屈服应力/MPa	切线模量/MPa
数值	910	6.25	0.28	3.5	3.125

### 1.2 计算网格划分

在碎冰区域航行时船-冰发生碰撞的部位主要是船艏和船体肩部,且为累积碰撞。尺寸较小的碎冰对

收稿日期:2020-12-16

作者简介:韩文栋(1992—),男,山东莒县人,山东省青岛船舶技术服务中心日照分中心助理工程师,硕士。

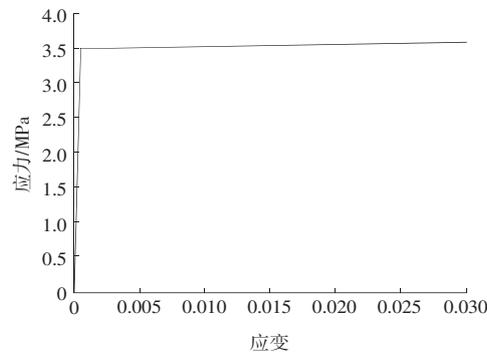


图 1 应力-应变曲线

船舶尾部影响可以忽略不计,故仿真选取 Fr130-Fr186 号肋位进行模拟。针对计算过程中可能出现的网格渗透问题,为兼顾计算机的计算工作量,选取 0.2~0.3 m 的网格尺寸对冰体网格进行划分,并鉴于冰区碎冰形状多为正太多边形,选取正五边形作为冰体的形状。船舶主要航行于北极航道,碎冰区域多为当年冰,且碎冰厚度与未破碎时的整冰厚度相当,主要为 0.8~1.2 m,故选取 1 m 作为冰厚。船体结构网格最小尺寸为 0.25 m,共分 85 019 个网格。

## 2 计算结果分析

### 2.1 不同面积下结构损伤变形量对比

在相同速度及碰撞角度等条件下,设计 10 m<sup>2</sup>、20 m<sup>2</sup>、30 m<sup>2</sup> 的碎冰面积,定量研究不同面积的碎冰多次碰撞船体时对船体位移变形量的影响。碎冰面积在 10 m<sup>2</sup>、20 m<sup>2</sup>、30 m<sup>2</sup> 三个不同工况下的船体位移变形量对比如图 2 所示,三个工况位移变形量均呈上升趋势,即变形量随碰撞次数的增加而增大;三个工况曲线相对趋于平缓,即随着船-冰碰撞次数的逐渐增加,相应的船体位移变形增加量随之减小;当撞击次数相同时,碎冰面积越大则位移变形量越大,即位移变形量与碎冰面积呈正比例变化。图 3 为碎冰面积分别为 10 m<sup>2</sup>、20 m<sup>2</sup>、30 m<sup>2</sup> 时船-冰发生碰撞后的总吸能图。三种工况下其结构总吸能均随着碰撞次数的增加呈现上升趋势;随着碎冰面积的增大,结构总吸能量增大,即结构总吸能量与碎冰面积呈正比例变化。

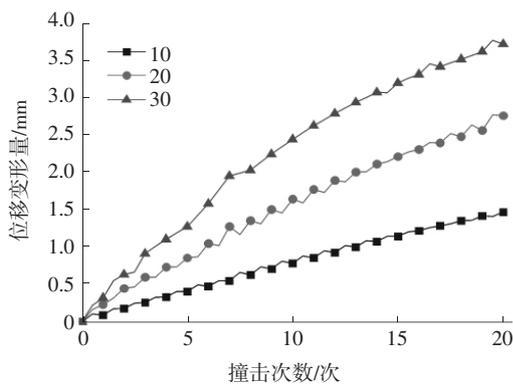


图 2 不同大小碎冰面积下的船体位移变形量

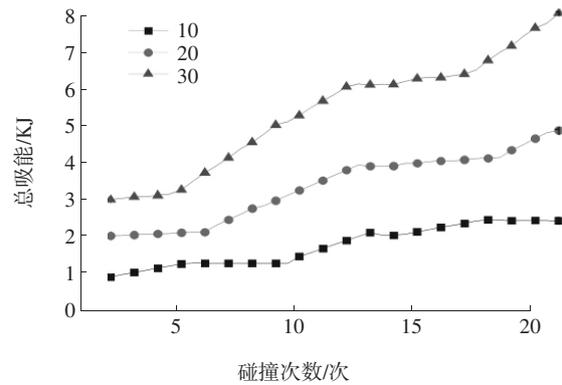


图 3 不同碎冰面积的总吸能

### 2.2 不同速度下结构损伤变形量对比

在相同面积及碰撞角度等条件下,设计 2 m/s、4 m/s、6 m/s、8 m/s 的碰撞速度,定量研究碰撞速度在多次碰撞船体时对船体位移变形量的影响。图 4 为船-冰碰撞速度在 2 m/s、4 m/s、6 m/s、8 m/s 四个设计工况下船体位移变形量对比图。由图 4 可知,除当碰撞速度为 4 m/s 时,在不同碰撞速度下随着撞击次数的增多船舶位移变形量呈增大趋势;四个工况曲线除 4 m/s 外趋于平缓,即随着碰撞次数的增加,增加的位移变形量的大小随之减小;当撞击次数相同时,碰撞速度越大则位移变形量也越大,即位移变形量与碰撞速度呈一定比例变化。以 4 m/s 的碰撞速度碰撞时产生较大误差,分析可能为碰撞周期不合理,恰与船舶变形回复时产生碰撞。图 5 所示为船-冰碰撞速度在 2 m/s、4 m/s、6 m/s、8 m/s 四种设计工况下发生碰撞后船舶结构吸能的

对比图。从图5可知,四种设计工况下随着碰撞次数的增加,结构总吸能及增加的幅度均呈现增大趋势。

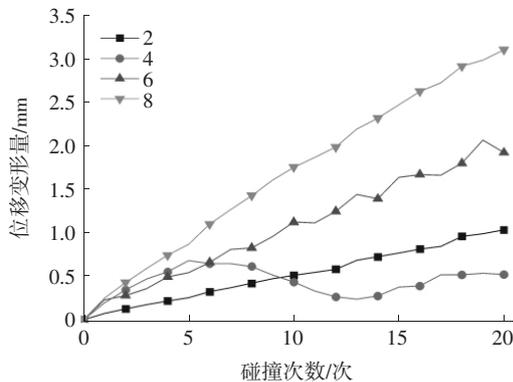


图4 不同碰撞速度时船体的位移变形量

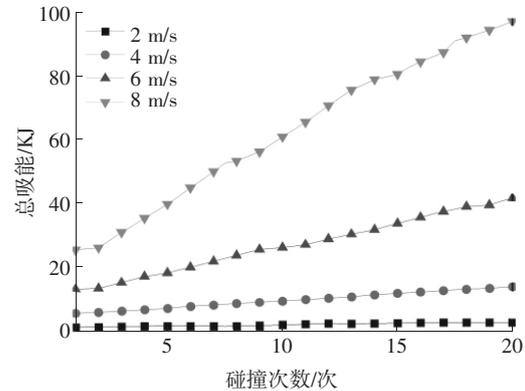


图5 不同碰撞速度时的总吸能

### 3 结束语

本文通过建立数值仿真模型,在进行定量分析的基础上针对不同碎冰尺寸、碰撞速度的影响进行数值模拟,通过多次碰撞累计损伤的研究。由此可知,船舶被撞区域的位移变形量与船-冰碰撞次数、碎冰面积、碰撞速度的线性关系。相同碎冰面积下随着碰撞次数增多,或是相同碰撞次数下随着碎冰面积的增大,抑或是撞击次数相同时随着碰撞速度的增大,船舶被撞区域的位移变形量呈增加趋势,但存在位移增量呈逐渐减小趋势。此外,随着碎冰面积及碰撞速度的增大,结构总吸能均增大,但结构总吸能量与碎冰面积呈正比例变化增加,结构总吸能量与碰撞速度呈指数变化增加。

### 参考文献:

- [1]Tuovinen P.The size distribution of Ice blocks in a broken bhannel [M],Fenlan:TKK,1979.
- [2]Kim M C,Lee S K,Lee W J,et al.Numerical and experimental investigation of the resistance performance of an icebreaking cargo vessel in pack ice conditions[J].International Journal of Naval Architecture & Ocean Engineering,2013 (1):116-131.
- [3]李紫麟.船舶在碎冰区航行的离散元模型及冰荷载分析[D].大连:大连理工大学,2013.
- [4]李夏炎.冰区航行船舶阻力性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.
- [5]国威.碎冰条件下冰区船冰水动力数值模拟研究[D].无锡:中国船舶科学研究中心水动力学重点实验室,2020.
- [6]刘为民.基于浮冰区参数化设计的船舶冰阻力数值模拟[D].镇江:江苏科技大学,2020.

(责任编辑:张 利)

## Research on Ship's Damage Mode Under Continuous Impact of Brash Ice

HAN Wen-dong, BAI Shuai, WANG Jin-feng, ZHAO Xiao-dong, LU Ming-hua, CUI Jian  
(Rizhao Branch, Shandong Qingdao Ship Technical Service Center, Rizhao 276800, China)

**Abstract:** In light of the research on influential mechanism of ship's speed and size of the brash ice on ship structure multiple collisions with small energy, numerical simulation is used to simulate the ship-ice collision in the brash ice water environment. Through the controlled variable method, a quantitative study is applied for the research of ship's dynamic structural response characteristics under parameters such as speed, number of collisions, and size of brash ice, so as to further reveal the regular characteristics of ship's own damage and deformation under different collision conditions, based on which the damage mode is drawn under the influence of ship's speed, size of brash ice and other factors in the multiple collisions between the brash ice and the ship.

**Key words:** brash ice; small energy; multiple collisions; cumulative damage