



# 船舶撞击作用下人字闸门损伤特征及影响因素分析

李姣<sup>1</sup>, 张洁<sup>2</sup>, 骆真波<sup>1</sup>, 周帆<sup>1</sup>, 胡英芝<sup>1</sup>, 符梦楠<sup>1</sup>

(1. 重庆资源与环境保护职业学院, 重庆 402360; 2. 西藏大学工学院, 西藏拉萨 850013)

**摘要:** 随着水运行业的发展, 船舶撞击人字闸门的事故屡有发生。为探究不同运行条件的船舶在进出船闸时闸门的撞击受损情况, 利用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立人字闸门和 5 000 吨级船舶的有限元模型, 通过闸门的撞击深度及应力状态分析闸门的损伤情况, 选取不同撞击速度、角度、船舶吨位和闸门厚度等工况进行全历程碰撞仿真, 分析不同因素的影响规律。结果表明: 在碰撞过程中, 船舶经历了接触、挤压和脱离 3 个阶段; 船舶动能最终转化为闸门变形能, 闸门损伤主要表现为撞击部位的塑性变形和激振现象; 随着撞击速度、角度和船舶吨位的增加, 撞击力明显增加, 随着闸门厚度的增加, 撞击力呈近乎线性减小。建立的船-闸门碰撞有限元模型能够较好地模拟碰撞的实际情况。

**关键词:** 人字闸门; 船舶撞击; 撞击力; 损伤特征; 影响因素

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0100-08

## Damage characteristics and influencing factors of miter gate under ship impact effect

LI Jiao<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>2</sup>, LUO Zhenbo<sup>1</sup>, ZHOU Fan<sup>1</sup>, HU Yingzhi<sup>1</sup>, FU Mengnan<sup>1</sup>

(1. Chongqing Resources and Environmental Protection Vocational College, Chongqing 402360, China;

2. School of Engineering, Tibet University, Lhasa 850013, China)

**Abstract:** With the advancement of the water transportation industry, instances of ships colliding with miter gates occur repeatedly. In order to investigate the extent of damage inflicted on gates when ships under various operational conditions navigate through ship locks, we use ANSYS/LS-DYNA software to build a finite element model encompassing a miter gate and a 5 000-ton class ship, and analyze gate damage in terms of impact depth and stress distribution. Then we vary various parameters such as impact velocity, angle, ship tonnage, and gate thickness to conduct comprehensive collision simulations, and analyze the influence of different factors. The results show that during the collision process, the ship undergoes three distinct stages: contact, compression, and detachment. The ship's kinetic energy is transformed into the deformation energy of the gate, primarily resulting in plastic deformation at the impact site and excitation phenomena. An increase in impact speed, angle, and ship tonnage leads to a significant rise in impact force, whereas miter gate thickness exhibits a nearly linear reduction in impact force. The finite element model presented herein accurately replicates real-world collision scenarios.

**Keywords:** miter gate; ship impact; impact force; damage characteristic; influencing factor

人字闸门是以三角拱的形式承受单向水压力的大型空间薄壁结构<sup>[1-2]</sup>, 由于其启闭力小、构造简单和操作方便等优点在大型船闸中被普遍使用。

然而人字闸门自身抗扭能力弱, 仅在自身重力和风压力作用下便会产生较大的扭转变形<sup>[3-4]</sup>, 一旦遭受船舶撞击, 则会面临巨大的生命财产损失。

收稿日期: 2024-02-24

作者简介: 李姣 (1998—), 女, 助教, 从事数学分析及数值模拟研究工作。

因此,在闸门设计阶段有必要考虑大型船舶的撞击作用,并针对不同影响因素下的撞击力和闸门损伤情况进行研究和预测,为减轻实际碰撞事故造成的损失提供更多的理论依据。

针对船-闸门碰撞常用的分析方法有 3 种,即经验公式法、碰撞试验法和有限元分析法。最早由 Minorsky<sup>[5]</sup>利用碰撞过程中的能量、动量和角动量守恒关系开创了船舶碰撞理论, Pedersen 等<sup>[6]</sup>在此基础上进行修正,扩大了该公式的应用范围。然而该方法考虑的结构形式较为单一,计算结果不具有代表性。相比之下,试验法能够反映碰撞的实际情况, Woisin<sup>[7]</sup>在此方向上开展多次船舶撞击试验,得出撞击能量、冲击力与船舶变形之间的关系。然而,试验法无法考虑碰撞过程中的几何非线性、接触非线性和材料非线性等因素。有限元分析法则较好地解决了这个问题,其通过输入碰撞结构的几何形状、材料本构以及破坏损伤等信息,能够得到更加精确的计算结果。通过有限元软件, Farinha 等<sup>[8]</sup>与 Buldgen 等<sup>[9]</sup>结合超级单元法快速评估船舶撞击作用下人字闸门的抗撞能力;马晓攀等<sup>[10]</sup>通过分析人字闸门各构件的变形和应力状态,结果表明,安装防撞装置后,闸门受撞部位的最大应力和位移都有显著下降;迟朝娜等<sup>[11]</sup>分析船舶撞击力与结构刚度、船舶吨位、撞击速度、撞击角度的关系,结果表明,船舶撞击力与上述因素均呈正比关系,但与撞击角度并不呈直接的正弦计算关系;曹士政等<sup>[12]</sup>提出一种新型三角闸门双重耗能防撞系统,并通过 ANSYS/LS-DYNA 软件对船舶-闸门进行撞击模拟,得出防撞系统受力特征和能量转化规律。因此,通过有限元法可以较好地模拟人字闸门受撞击后的损伤状态并得到相应的撞击力结果。

本文基于 ANSYS/LS-DYNA 软件,建立人字闸门以及 5 000 吨级船舶的非线性有限元模型,并进行二者的高分辨率有限元碰撞仿真。通过分析撞

击力、能量及撞击深度等结果参数,讨论船舶撞击作用下人字闸门全局及局部损伤特征,随后研究不同因素下撞击力的变化规律,可为船舶进出船闸时的运行状态提供参考依据。

## 1 碰撞理论及有限元建模

### 1.1 碰撞非线性有限元控制方程

基于拉格朗日法建立有限元控制方程,碰撞运动方程可表示为<sup>[13]</sup>:

$$M\ddot{a} + C\dot{b} + Kc = F_{\text{ext}} \quad (1)$$

式中:  $M$  为质量矩阵,  $C$  为阻尼矩阵,  $K$  为刚度矩阵,  $a$  为加速度向量,  $b$  为速度向量,  $c$  为位移向量,  $F_{\text{ext}}$  为碰撞力在内的外力向量。

### 1.2 闸门材料及参数设置

研究对象人字闸门的几何模型参照图 1 的船闸下闸首闸门的实际结构尺寸建立而成。闸门跨度 20.2 m、高 38.95 m,主要包括门叶、支承结构、止水结构和辅助结构等。在受撞击时,闸门处于关闭状态,上游最高水位为 63.58 m,下游水位 34.00 m,因此闸门在被撞击的同时承受着 29.58 m 的水头差压力,水压力施加情况见图 2。

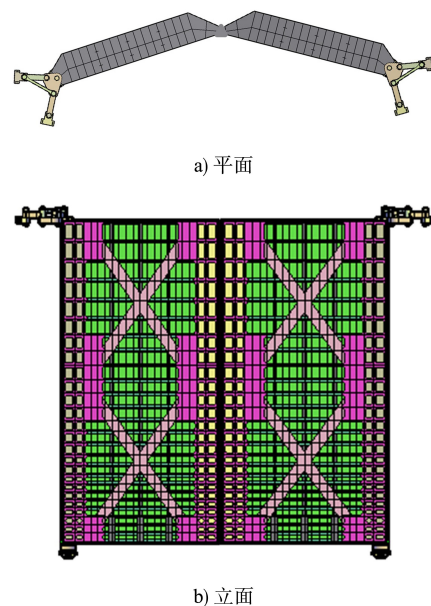


图 1 人字闸门结构

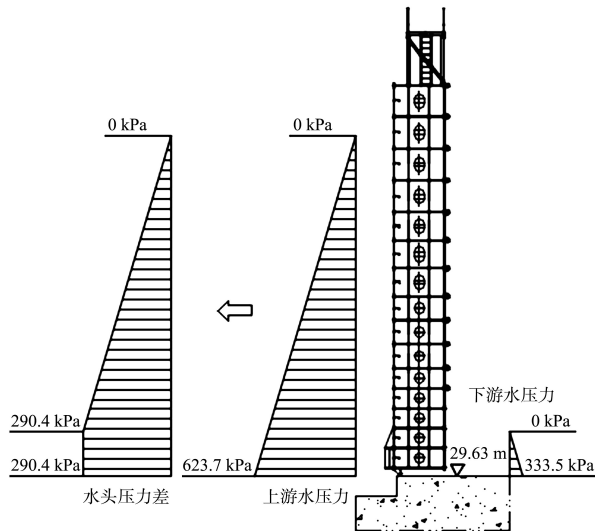


图2 闸门水压力分布

在进行船舶撞击人字闸门的仿真计算时, 闸门破坏的直接表现是结构延性殆尽而断裂, 其微观破坏原因为材料中各种位错和缺陷运动的发展。当应变速率较高时, 运动受到阻碍, 导致材料的屈服强度增加, 而应变速率较低时, 材料中的位错和缺陷有足够的时间移动和聚合, 从而导致材料的屈服强度降低。为此, 人字闸门材料的应变速率应重点考虑。本文采用 COWPER-SYMONDS<sup>[14]</sup> 本构方程表达材料的应变速率与屈服强度之间的关系:

$$\sigma'_0/\sigma_0 = 1 + (\dot{\epsilon}/p)^{1/q} \quad (2)$$

式中:  $\sigma'_0$  为动屈服应力,  $\sigma_0$  为静屈服应力,  $\dot{\epsilon}$  为材料应变率,  $p$ 、 $q$  为相关参数。

此外, 确定钢材的失效应变值也是准确预测闸门结构损伤的关键参数。相关研究表明<sup>[15]</sup>, 材料的塑性失效应变取值不仅与材料本身的物理性质及其受力状况有关, 还与其划分单元网格尺寸大小有关, 且应变值与单元尺寸大致呈反比关系。最新试验表明<sup>[16]</sup>, 破坏模式为拉伸撕裂的方板冲击, 其失效应变值可取材料真实应变的 20%。结合各方面情况, 本文失效应变取 0.19。人字闸门的材料参数设置为: 密度  $7850 \text{ kg/m}^3$ , 弹性模量  $206 \text{ GPa}$ , 泊松比 0.3, 屈服强度  $370 \text{ MPa}$ ,  $p$  为 40.4,  $q$  为 5.0, 失效应变为 0.19。

### 1.3 闸门有限元建模

利用 Rhino 建模软件建立人字闸门模型, 选

用 SHELL181 单元体作为建模材料, 可充分模拟人字闸门在船舶撞击作用下的屈曲、褶皱和撕裂等损伤特性。建模时对闸门结构进行合理简化, 只考虑闸门的单扇门叶部分并保持其构造、尺寸及质量等基本参数与实际闸门相等, 其余构件以约束的形式施加。

考虑到撞击损伤区域的局部性能特征, 将闸门视为弹塑性材料, 计算时选用弹塑性材料模型 (MAT PLASTIC KINEMATIC, MAT 03), 该模型适用于模拟具有速率效应的各向同性和运动硬化塑性, 已被广泛用于描述钢结构在冲击荷载下的力学行为<sup>[17]</sup>。

在 ANSYS/LS-DYNA 软件中, 利用 contact 自动曲面对曲面的接触算法定义刚性球鼻艏与人字闸门面板之间的接触, 动力系数与动摩擦系数均设置为 0.2。此外, 采用接触算法 (contact TIED\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_OFFSET) 模拟人字闸门内部结构之间的接触。为控制沙漏大小, 船体和入字闸门的网格单元以六面体为主。为保证计算精度同时减少计算时间, 网格大小以碰撞位置为依据分部划分, 与以往的研究相似, 模型中对碰撞区域的网格进行精细化处理, 网格单元的长厚比设置在 5~10 之间以更好地捕捉到局部应力、应变场, 其余网格使用粗网格和简化处理。为模拟闸门被撞的实际过程, 约束闸门顶底枢 3 个方向的位移, 约束门轴柱相对于面板迎水面  $22.5^\circ$  方向的位移, 约束斜接柱相对于面板迎水面  $-22.5^\circ$  方向的位移, 在启闭杆轴向设置大小为闸门自重 1/5 的拉力。

### 1.4 船舶撞击闸门有限元模型

撞击船舶选取 5 000 吨级货运集装箱船, 选用 SOLID163 单元作为船体建模材料, 模拟船舶撞击人字闸门的非线性过程。由于船体结构变形不是此次研究重点, 因此, 为减少计算时间, 建模时只考虑参与撞击的船首部分, 其余结构采用等效船体梁法将未变形的船体结构分离出来, 以等效质量的方式加载到船首; 同时利用附加质量法<sup>[18]</sup> 增加 4% 的船体质量, 以模拟船舶周围流体对碰撞

产生的影响, 整个过程可通过改变船体密度的方式进行。此外, 为减少分析时间, 采用刚性材料模型(MAT rigid, MAT 20)模拟船体结构, 使所有节点的自由度均耦合到船体的质量中心。船舶撞击人字闸门的数值模型见图 3。

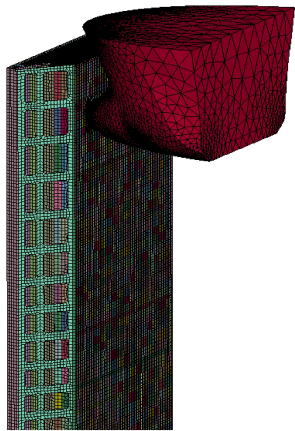


图 3 船舶撞击人字闸门有限元模型

## 2 典型工况仿真计算

### 2.1 航速及撞击力分析

船舶撞击人字闸门过程中船舶撞击力及船速时程曲线见图 4。可以看出, 船舶与闸门发生接触之后, 船速迅速下降, 船舶撞击力急速增加, 随后振荡式缓慢上升, 于 0.103 s 时达到峰值, 峰后撞击力断崖式下降, 经过又一次波峰后逐渐降低为 0 N, 整个碰撞过程呈现出明显的非线性特性, 共经历 3 个阶段: 1) 接触阶段。在  $0 \sim < 0.018$  s, 船舶以 1 m/s 的速度匀速撞向闸门, 在此期间, 二者刚开始接触, 船舶撞击力便迅速响应并直线式增长, 而船速由于惯性作用并未降低。2) 挤压阶段。在  $0.018 \sim < 0.276$  s, 船舶球鼻艏与闸门面板全面接触并相互挤压, 由于闸门的阻挡作用, 船舶速度迅速降低, 并于 0.218 s 降低为 0 m/s, 此后在闸门的反弹作用下反向加速行驶, 至 0.276 s 时匀速脱离闸门。在此期间, 船舶撞击力在经历了急速上升之后转为振荡式上升, 这是由于闸门面板在短时间内频繁撞击力的作用下出现激振现象; 在 0.105 s 时船舶撞击力达到峰值, 此后断崖式下跌, 此后船闸门碰撞进入卸载阶段, 船舶撞击力出现小幅度回弹, 并于 0.276 s 时降低为 0 N。

3) 脱离阶段。 $0.276 \sim < 0.500$  s 内, 船舶以 0.057 m/s 的速度反向匀速行驶, 船舶撞击力降低为 0 N 并不再改变, 二者正式脱离接触。

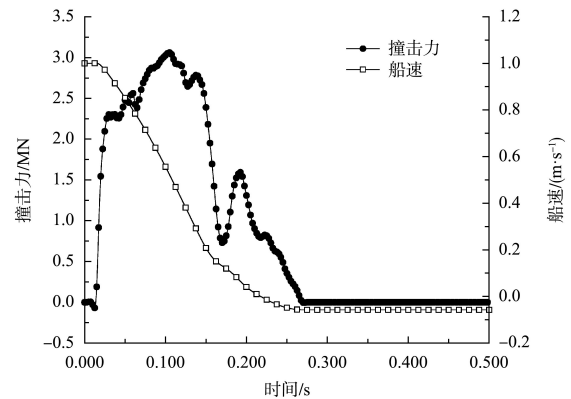


图 4 船撞击力、船速时程曲线

### 2.2 各部分能量分布

船舶-人字闸门发生碰撞后二者的能量时程曲线见图 5, 与以往的研究结论类似, 系统能量几乎不随时间推移而变化, 其余各能量随时间变化相互转化。其中, 船舶动能随船速降低而减小并迅速转化为闸门内能, 闸门内能的主要耗散形式主要有 3 种, 分别为撞击后闸门各结构发生振动产生的振动能、撞击部位发生挤压塑性变形产生的压溃能和闸门整体产生晃动产生的变形能。

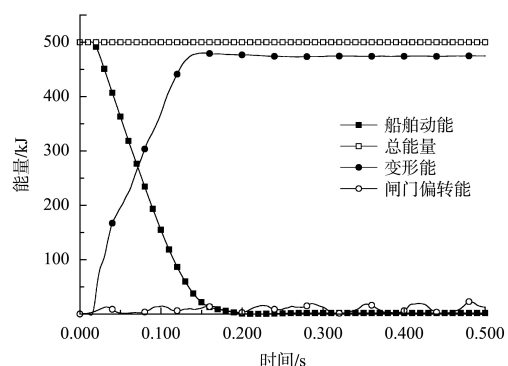


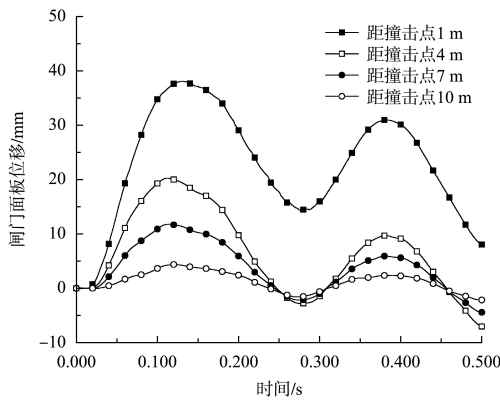
图 5 船-闸门能量时程曲线

### 2.3 闸门撞击深度

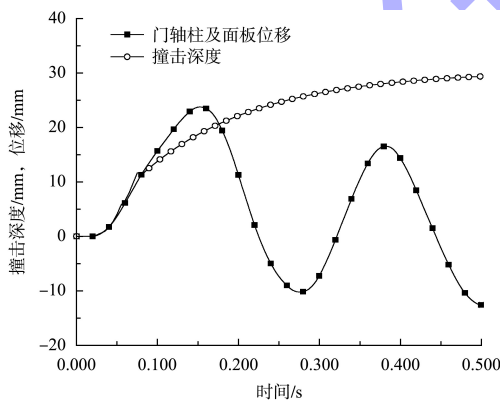
与以往研究结果不同, 闸门在受到船舶的强力撞击后, 不仅在被撞部位发生动态响应, 闸门其余结构也会产生相应的变形或位移。为更精确地分析闸门结构的变形情况, 分别于撞击点、斜接柱及距撞击点 1、4、7 和 10 m 处布置变形监测



点, 获得闸门各结构的变形监测曲线, 见图 6。由图 6a) 可知, 撞击发生的同时, 撞击部位的闸门面板随即产生激振现象, 随着应力的传播, 远离撞击部位的面板也相继发生振动, 但振动幅度随着撞心距的增加而逐渐减小; 由图 6b) 可知, 闸门面板在球鼻艏的挤压作用下, 出现明显塑性变形, 塑性变形在经历加速增长之后开始趋于平缓, 最后稳定在约 30 mm 处, 即为闸门最终撞击深度。同时, 闸门整体以门轴柱为轴心产生反复式弧形晃动, 晃动幅度呈现出减小趋势。



a) 闸门面板振动位移监测曲线

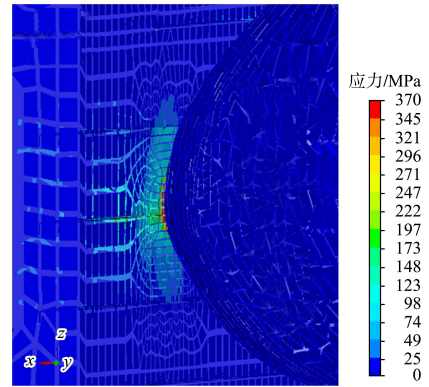


b) 门轴柱及面板位移和撞击深度监测曲线

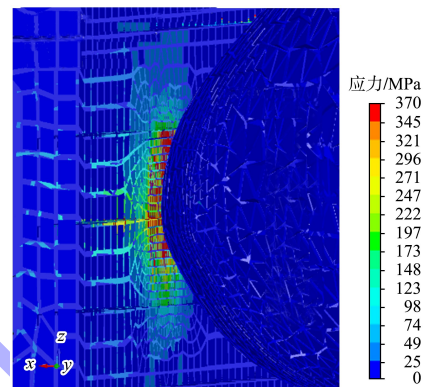
图 6 闸门变形监测曲线

### 2.4 闸门损伤特征

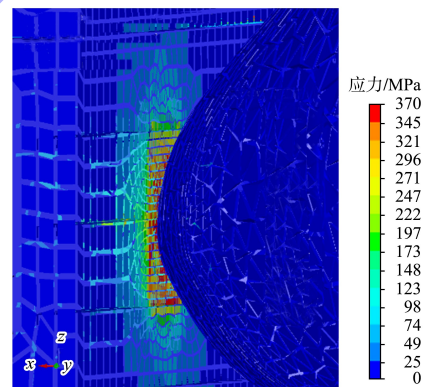
船-闸门发生碰撞后, 闸门的损伤过程与结构的塑性变形同步进行, 通过 Von Mises 应力云图可以直观地观察闸门的损伤情况, 闸门应力变化情况见图 7。



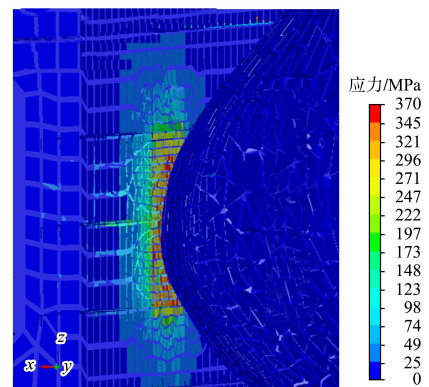
a)  $t=0.02$  s



b)  $t=0.05$  s



c)  $t=0.10$  s



d)  $t=0.25$  s

图 7 船撞闸门应力云图

由图 7 所知, 闸门面板在受船舶撞击后出现明显的应力集中区域, 当撞击力达到闸门材料的屈服强度时, 闸门面板开始出现塑性变形, 对应的变形区域即塑性区。在碰撞的初始阶段( $t=0.02\text{ s}$ ), Von Mises 应力较大, 撞击点应力迅速达到  $370\text{ MPa}$ , 超过了闸门面板的屈服强度, 因此发生明显的塑性变形, 但塑性变形区面积较小; 到碰撞中期( $t$  为  $0.05\sim 0.10\text{ s}$ ), 船舶球鼻艏与闸门面板的接触面积变大, 且有侵入闸门面板的迹象, 船舶动能大部分被闸门面板消耗, 使得闸门面板的压缩塑性损伤面积扩大, 从而形成明显的凹陷; 撞击末期( $t=0.25\text{ s}$ ), 船舶反向行驶, 使得面板塑性变形区面积不再改变, 表明此时闸门面板已经形成永久变形。

### 3 不同因素下的碰撞结果对比

#### 3.1 撞击速度的影响

为分析不同撞击速度对船撞击力的影响规律, 使  $5\,000$  吨船级船分别以  $0.2$ 、 $0.5$ 、 $1.0$ 、 $2.0\text{ m/s}$  的速度正撞人字闸门, 其船撞击力变化规律见图 8。

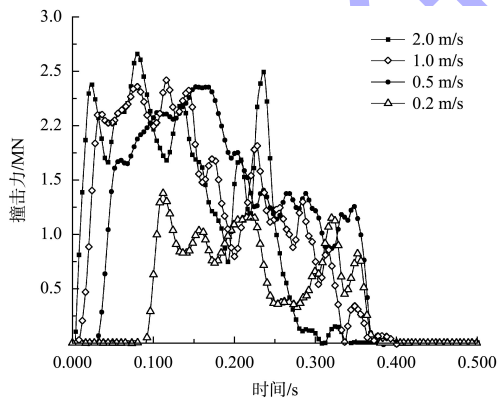


图 8 不同船舶速度下船撞击力时程曲线

已建船-闸门有限元模型两者之间有一定的初始距离, 因此船速越大, 撞击力越早响应, 这与图 8 中反映的情况相同。此外, 在碰撞初期, 撞击力均呈近线性极速增加, 随后出现多处波峰和波谷, 呈现出明显的非线性特点, 这表明不断有闸门结构发生屈服破坏, 且船速越高, 波动幅度越大, 表明更多的结构发生破坏。根据图 8 数据

统计各撞击工况的撞击力峰值及作用持续时间, 见表 1。

表 1 船舶撞击力特征值

船舶速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	撞击力峰值/MN	接触时间/s
0.2	0.37	0.278
0.5	2.35	0.338
1.0	2.41	0.357
2.0	2.65	0.363

由表 1 可知, 随着船速的增加, 撞击力峰值和撞击作用持续时间均随之增加, 但没有明显的线性增长趋势。然而作用时间越长, 对闸门的损伤越大, 表明船速越大, 闸门将承受的破坏越强。

#### 3.2 撞击角度的影响

在实际船-闸门碰撞过程中总存在一定的撞击角度, 为探究撞击角度对撞击力大小的影响, 定义撞击角度  $\alpha$  为船舶航行方向与闸门面板之间的夹角, 见图 9。

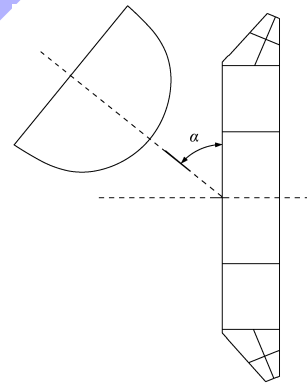


图 9 撞击角度  $\alpha$

在吨位和船速一定的情况下, 选取  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  及  $90^\circ$  撞击工况, 得出的撞击力时程曲线见图 10。

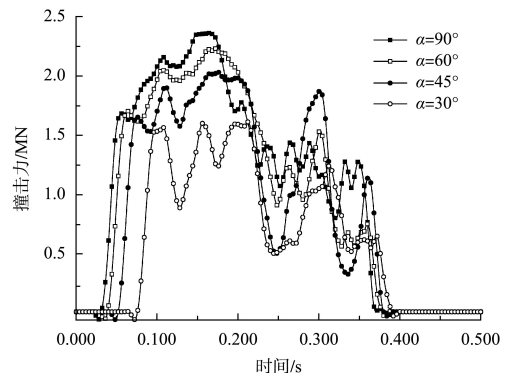


图 10 不同船舶撞击角度下船撞击力时程曲线

由图 10 可知,当船舶斜向撞击人字闸门时,撞击力峰值明显小于正撞工况。例如,撞击角度为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$  时,撞击力峰值分别为 1.60、2.02、2.22、2.35 MN,撞击力峰值随着撞击角度增大持续变大,这是由于撞击角度增大,沿撞击部位的法向速度也随着增加,船舶不易在闸门面板处发生切向滑移,因此参与撞击的能量更多、撞击力更大,同时导致的闸门变形也更严重。

### 3.3 船舶吨位的影响

由于船舶载质量不同和船舶类型的非一致性,撞击闸门时的船舶吨位并不相同,因此分析船-闸门碰撞问题时船舶吨位是必须要考虑的影响因素。控制其他影响因素不变,即船舶速度设置为 2 m/s,撞击角度为  $90^\circ$ ,选取 1 000、2 000、3 000、4 000 和 5 000 t 的船舶进行船撞力时程曲线分析,见图 11。

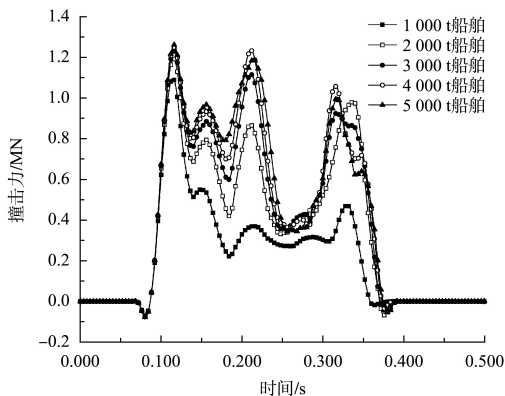


图 11 不同船舶吨位下船撞力时程曲线

由图 11 可知,船舶速度相同时,撞击力在同一时间响应,随着船舶吨位的增加,撞击力峰值明显增加,此外,除 1 000 t 船舶撞击外,其余船舶撞击作用持续时间变化不大,这表明船舶吨位超过一定值后,其与闸门的作用过程类似。

### 3.4 闸门厚度的影响

在闸门设计中,增加面板厚度可增强自身强度,为探究不同闸门厚度对船撞力影响规律,分别选取厚度 20、30、40 及 50 mm 的面板,计算并分析船舶撞击力的变化情况,见图 12。

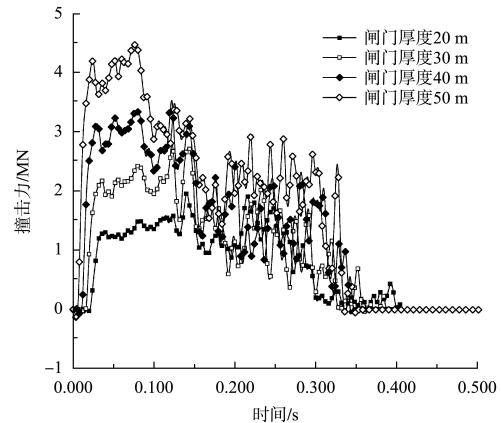


图 12 不同闸门厚度下船撞力时程曲线

由图 12 可知,随着闸门面板厚度的增加,撞击力呈近线性增长,但撞击时间不断减小,这是由于面板厚度增加将导致刚度的增加,闸门反弹能力上升。此外,碰撞初期撞击力增大,其增长斜率随闸门面板厚度增大。

综上所述,船舶的吨位、撞击速度以及撞击角度增大均使撞击力增大。因此,大吨位、大航速的船舶在进出船闸的时候对闸门存在巨大的撞击威胁,或使得闸门有坍塌风险。因此,在船闸通航的船舶应尽量减小通航速度,若无法阻止撞击,应及时调整撞击角度,避免正撞闸门的情况发生。

## 4 结论

1) 船舶撞击闸门过程是一个船舶速度降低,动能逐渐消耗并最终转化为闸门变形能的过程,期间船舶撞击力呈非线性变化。

2) 在局部损伤方面,闸门面板在撞击部位出现了明显的应力集中现象,且随着撞击力的增大,面板塑性区面积逐渐增大,最终形成永久变形;在整体损伤方面,闸门整体产生反复式弧形晃动,各结构发生激振现象。

3) 船舶撞击力随船舶撞击速度、撞击角度和船舶吨位的增加呈非线性增长,但随闸门厚度的增加呈线性增长。

## 参考文献:

- [1] 邢述炳. 人字闸门扭转变位的相似三角形法则[J]. 水运工程, 2018(2): 123-127.
- [2] 徐翔, 李忠凯, 赵美云, 等. 人字闸门动态运行特性模拟及数值分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(7): 213-216, 155.
- [3] 姚家晖, 杨光明. 太阳辐射对人字闸门影响的有限元分析[J]. 水运工程, 2022(9): 116-121.
- [4] 孙保虎, 黄亚栋, 徐洪强. 基于 Ansys 的大型船闸人字闸门背拉杆预应力设计[J]. 水运工程, 2018(12): 143-146.
- [5] MINORSKY V U. An analysis of ship collisions with reference to nuclear power plants [J]. Journal of ship research, 1959, 3(2): 1-4.
- [6] PEDERSEN P T, ZHANG S M. On impact mechanics in ship collisions [J]. Marine structures, 1998, 11(10): 429-449.
- [7] WOISIN G. Instantaneous loss of energy with unsymmetric ship collisions [C]//Norwegian Institute of Technology. International Symposium on Practical Design of Ships and Mobile Units, 3rd. Trondheim: Norwegian Institute of Technology, 1987: 1-12.
- [8] FARINHA A, SOUSA L, REIS L. Evaluating lock gates' strength due to ship collisions: a douro waterway lock gates case study[J]. Marine structures, 2018, 60: 261-278.
- [9] BULDGEN L, SOURNE H L, RIGO P. A simplified analytical method to estimate the resistance of plane lock gates impacted by river barges [J]. Marine structures, 2015, 43: 61-86.
- [10] 马晓攀, 王海建. 船舶撞击作用下船闸人字门三维有限元动力分析[J]. 广东水利水电, 2022(8): 1-6.
- [11] 迟朝娜, 徐宗美. 基于 ANSYS/LS-DYNA 模块的船-闸撞击力分析[J]. 水运工程, 2021(8): 129-133.
- [12] 曹士政, 朱明涛, 朱颖, 等. 三角闸门双重耗能防撞系统设计[J]. 水运工程, 2021(1): 17-20, 55.
- [13] 张爱锋, 刘少康, 姚苗苗, 等. 船桥碰撞结构损伤及船撞力影响因素分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 121-127.
- [14] HERNANDEZ C, MARANON A, ASHCROFT I A, et al. A computational determination of the Cowper-Symonds parameters from a single Taylor test [J]. Applied mathematical modelling, 2013, 37(7): 4698-4708.
- [15] SHA Y Y, HAO H. Nonlinear finite element analysis of barge collision with a single bridge pier[J]. Engineering structures, 2012, 41: 63-76.
- [16] 张志强, 李华峰, 张咏鸥, 等. 失效准则在船舶碰撞破坏中的应用研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(1): 56-62.
- [17] FAN W, YUAN W C, ZHOU M. A nonlinear dynamic macro-element for demand assessment of bridge substructures subjected to ship collision [J]. Journal of Zhejiang University-science A (applied physics & engineering), 2011, 12(11): 826-836.
- [18] 胡友一, 王珏, 陆中伟, 等. 附加质量法和 FSI 法用于弧形闸门动力特性分析的适用性[J]. 中国港湾建设, 2024, 44(1): 1-6.

(本文编辑 王璁)

(上接第 99 页)

- [14] 段黎明. 船闸输水系统单明沟与消力槛协同消能特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- [15] 陈明, 杨颖, 黄海津, 等. 船闸输水系统单明沟与消力槛联合布置的消能特性[J]. 水运工程, 2021(7): 122-129.
- [16] 沈立群, 刘浩源, 聂艺博, 等. 船闸闸墙长廊道侧支孔输水系统闸室内消力槛研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(12): 217-223.
- [17] HU Q Y, LI Y, ZHU L. Effect of parameters of ditch geometry on the uniformity of water filling in ship lock chambers[J]. Journal of marine science and engineering, 2024, 12(1): 12010086.
- [18] LAUNDER B E, SPALDING D B. Mathematical models of turbulence[M]. New York: Academic Press, 1972.
- [19] 中交水运规划设计院. 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

(本文编辑 王璁)