



三角闸门双重耗能防撞系统设计

曹士政¹, 朱明涛^{2,3}, 朱颖³, 朱召泉³

(1. 安徽港航建设投资集团有限公司, 安徽 合肥 230092;

2. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014; 3. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 结合裕溪一线改扩建船闸三角闸门的方案设计, 提出一种泡沫铝夹芯板-弹簧支撑杆件的新型三角闸门双重耗能防撞系统。通过对三角闸门新型防撞系统进行船舶撞击的数值模拟, 得知防撞系统受撞过程中的受力特征和能量转化规律。对泡沫铝厚度和弹簧支撑杆件刚度进行参数分析并与传统防撞系统进行对比, 结果表明泡沫铝夹芯板和弹簧支撑杆件的联合使用可以减轻防撞系统自重力, 减小船舶撞击力。

关键词: 三角闸门; 船闸碰撞; 防撞系统; 双重耗能; 数值模拟

中图分类号: TV 663.2; U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0017-04

Design of double energy-consuming anti-collision system of sector lock gate

CAO Shi-zheng¹, ZHU Ming-tao^{2,3}, ZHU Ying³, ZHU Zhao-quan³

(1. Anhui Provincial Port & Shipping Construction Investment Group Company, Hefei 230092, China;

2. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China;

3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Combining with the conceptual design of the reconstruction and extension of the sector lock gate of the first line ship lock in the Yuxi River, we propose a new type of double energy-consuming anti-collision system with aluminum foam sandwich panel and supporting bar with spring to improve the anti-collision performance of the sector lock gate. By the numerical simulation of the ship impact on a new anti-collision system of the sector lock gate, we know the mechanical characteristics and energy conversion law of the anti-collision system. Through the parameter analysis of the aluminum foam sandwich panel thickness and the stiffness of supporting bar with spring and comparison with the traditional anti-collision system, it is shown that the combined use of aluminum foam sandwich plate and supporting bar with spring can reduce the weight of the anti-collision system and reduce the impact force of the ship.

Keywords: sector lock gate; ship-gate collision; anti-collision system; double energy-consuming; numerical simulation

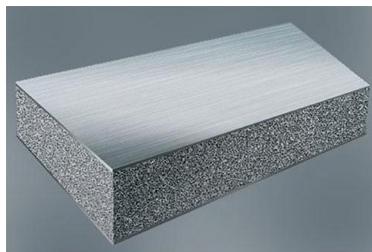
传统的船闸三角闸门常在靠近航道一侧布置钢制防撞面板体系, 以抵抗船舶进出闸室时的刮擦碰撞。但当防撞面板及其支撑体系较重时, 将使原本对称的三角闸门结构产生偏重, 从而使闸门产生扭转变形, 也会对闸门顶、底枢的受力及工作产生不利影响^[1], 甚至引起偏磨。因此, 在闸门防撞设计时既要保证防撞设施能够承受一定

的船舶撞击力, 使其通过自身变形耗能消散掉大部分的船舶撞击力, 以避免将船舶撞击力直接传递到闸门的主要受力构件上, 又要避免防撞设施过重对闸门产生偏重等不利影响。本文结合裕溪一线改扩建船闸三角闸门的方案设计, 提出一种泡沫铝夹芯板-弹簧支撑杆件的新型三角闸门双重耗能防撞系统, 并通过船舶-闸门撞击的数值模

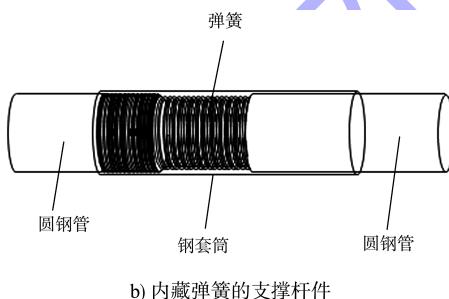
拟, 得知防撞系统受撞过程中的受力特征和能量转化规律。以期为船闸三角闸门防撞系统的合理设计提供参考。

1 新型防撞系统设计

针对以往工程中三角闸门钢制防撞面板体系受船舶撞击时耗能能力弱而对三角门主体结构传导撞击力过大的问题, 提出一种双重耗能的三角门防撞体系^[2]。根据三角闸门的结构布置, 对现有的三角闸门刚性防撞系统进行改进, 用泡沫铝夹芯板代替传统钢制面板, 用带有弹簧的支撑杆件代替传统防撞系统面板梁格后的刚性支撑杆件^[3], 利用泡沫铝的吸能特性吸收船舶动能, 同时利用弹簧支撑杆件的弹性变形减小船舶撞击后传到三角门主体结构上的撞击力, 如图 1 所示。



a) 泡沫铝夹芯板



b) 内藏弹簧的支撑杆件

图 1 双向耗能三角闸门防撞体系的基本组件

在实际设计时, 防撞系统的面板支承梁系可采用工字梁, 泡沫铝夹芯板可采用分块安装的方式, 通过螺栓连接于面板支承梁格翼缘上, 便于受撞损坏后的更换维修。弹簧支撑杆件主要通过弹簧连接两端圆钢管, 圆钢管两端再分别与三角闸门主体支臂和防撞系统面板支承梁格相连。为保证连接弹簧能够承受非轴向力, 同时防止弹簧受撞失稳, 在弹簧外侧布置有一端固定一端自由

的钢套筒(图 1), 使弹簧不致发生较大的弯曲变形, 而以轴向压缩变形为主, 从而使船舶撞击力通过压缩弹性变形耗能, 减小传递到三角门主体结构上的撞击力的效果。

2 泡沫铝夹芯板受撞参数数值分析

采用 ANSYS/LS-DYNA 软件进行结构碰撞分析, 选用 LS-DYNA 中的 63 号材料可压扁泡沫 (*MAT CRUSHALBE FOAM) 模拟三角门防撞系统面板芯层泡沫铝。由于船舶进、出闸室时速度较低, 与防撞系统的碰撞时应变率不高, 且研究表明^[4]泡沫铝的应变率效应并不显著, 故忽略其应变率效应。所用泡沫铝的相关材料参数^[5]取值见表 1, 其材料压缩应力-体积应变曲线见图 2^[3]。

表 1 泡沫铝材料参数设置

弹性模量 E/MPa	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 μ	拉伸应力 截断值/MPa	阻尼系数
1 200	540	0.31	7.5	0.5

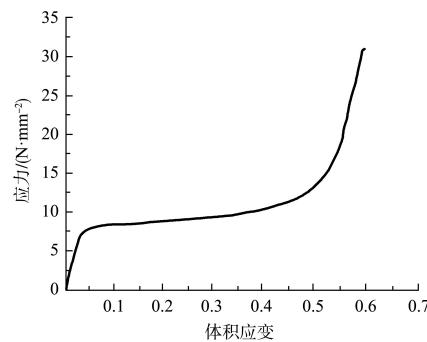


图 2 泡沫铝应力与体积应变关系

根据 LS-DYNA 63 号材料特性, 对泡沫铝采用 solid 165 单元建模。为模拟泡沫铝受压的变形特征, 泡沫铝单元尺寸在面板平面内选择为 50 mm, 在厚度方向选择为 20 mm。为防止泡沫铝在模拟中出现负体积而导致计算终止, 对其施加 *contact interior 接触; 泡沫铝上、下表面钢板采用 Shell 163 单元模拟, 网格尺寸与芯体一样, 将泡沫铝芯体和上下表面视为理想界面, 采用共节点的方式建模。

由于泡沫铝夹芯板的受力性能主要由芯体和上、下钢面层厚度决定, 为了与初步设计的传统防撞结构面板(10 mm 厚钢板)对比, 在保证上、下钢面板不因塑性变形较大而导致单元失效删除

的情况下, 通过试算控制夹芯板上下钢面层厚度为 3 mm, 结合工程中常用的泡沫铝板厚度, 分别将泡沫铝厚度设置为 40、60、80 mm, 以分析泡沫铝芯体厚度对防撞吸能效果的影响。其中厚度为 60 mm 时, 夹芯板质量与原结构相当, 厚度为 40 mm 和 80 mm 的夹芯板质量较原结构分别下降 12.5% 和提高 15%。

表 2 不同泡沫铝厚度下泡沫铝夹芯板各部件耗能占比

泡沫铝 厚度/mm	面层		芯体		底层		其余部件		总体	
	能量/kJ	占比/%								
40	127	30.0	91	21.5	63	14.9	142	33.6	423	100
60	110	26.4	111	26.5	50	11.9	148	35.3	418	100
80	88	21.6	124	30.5	39	9.6	155	38.2	410	100

3 双重耗能三角门防撞体系撞击分析

在上述三角闸门防撞体系中的泡沫铝夹芯板耗散了部分撞击能量以后, 为进一步减小传到三角闸门主支臂上的撞击力, 在泡沫铝夹芯板支承梁格后的空间支撑桁架结构圆管构件中, 进一步设置可压缩弹簧, 做成内藏弹簧的圆管支撑杆件(图 1), 各杆件所受的撞击压力可通过弹簧的压缩变形进行二次耗能。为此建立该弹簧支撑杆件体系的有限元分析模型, 参考 LS-DYNA 官方手册^[6], 建议对该弹簧和套筒构造采用单个轴向刚度较小的 Beam 161 梁单元予以等效处理。弹簧位置及有限元模型见图 3。

表 2 为 63 号材料泡沫铝夹芯板受撞情况下, 不同泡沫铝厚度的泡沫铝夹芯板各部件耗能占比对比结果。可以看出, 随着泡沫铝厚度的增加, 除去泡沫铝外的三角闸门防撞系统各部件耗能从 328 kJ 逐步减小到 308 kJ 和 282 kJ, 泡沫铝吸收的能量占比越来越大, 由于泡沫铝优异的吸能特性, 能够减小防撞系统其他部件的损伤。

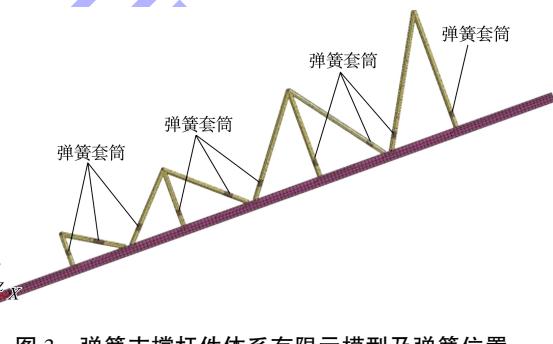


图 3 弹簧支撑杆件体系有限元模型及弹簧位置

通过数值分析, 对于不设置弹簧和分别设置不同刚度的内藏弹簧的圆管支撑杆件, 其受撞过程中, 三角闸门防撞体系各组成部分的耗能情况如表 3 所示。

表 3 三角闸门防撞系统各部件能量消耗占比

构件	初始(无弹簧)		0.05EA		0.02EA		0.01EA	
	能量/kJ	占比/%	能量/kJ	占比/%	能量/kJ	占比/%	能量/kJ	占比/%
面板	54.7	20.3	51.5	20.2	59.9	26.2	72.5	37.4
T型梁腹板	117.9	43.8	94.5	37.1	48.9	21.4	32.6	16.8
T型梁翼缘	44.2	16.4	40.8	16.0	40.0	17.5	38.6	19.9
肋板	50.9	18.9	43.0	16.9	41.1	18.0	37.6	19.4
防撞杆件	1.6	0.6	24.2	9.5	33.8	14.8	9.7	5.0
弹簧	-	-	0.8	0.3	4.9	2.1	2.9	1.5
消耗总能量	269.3	100.0	254.8	100.0	228.6	100.0	193.9	100.0

注: 表中 E 为钢材的弹性模量, A 为杆件的截面积。

从表 3 可以看出, 在没有弹簧的三角闸门传统防撞系统中, 防撞板支撑体系中吸收船舶动能的主要部件为面板背后的 T 型支承梁的腹板, 面板塑性变形吸收的能量并非最大。在防撞系统支撑杆件增加弹簧套筒后, 弹簧通过自身的弹性变

形, 在受撞压缩阶段将船舶撞击动能暂时储存为其自身的弹性变形能, 在压缩回弹阶段又将其储存的动能释放, 通过这种方式实现了能量的转移, 降低了结构损伤。随着弹簧刚度的降低, 面板吸收能量占比逐渐增加, 当弹簧轴向刚度为 0.01EA

时, 面板耗能占比为 37.4%, 远高于其他部件, 防撞系统的损伤已经从面板后的支承体系逐渐转换到面板上, 面板成为防撞系统损伤耗能的第一道防线, 当防撞面板受撞损伤较大时可方便对其进行更换, 更加符合防撞系统的设计思路。

4 三角闸门新型与传统防撞系统防撞效果的对比分析

为了验证新型三角闸门双重耗能防撞系统的效果, 结合裕溪一线改扩建船闸三角闸门的初步设计方案, 分别按传统的防撞体系和新型防撞体系建立整个三角闸门的有限元分析模型, 进行三角闸门在开门状态下碰撞有限元分析(图 4), 船舶撞击位置取在防撞面板中部(图 5), 进出闸的速度取 2 m/s, 与防撞板正面撞击的水平夹角取 25°。

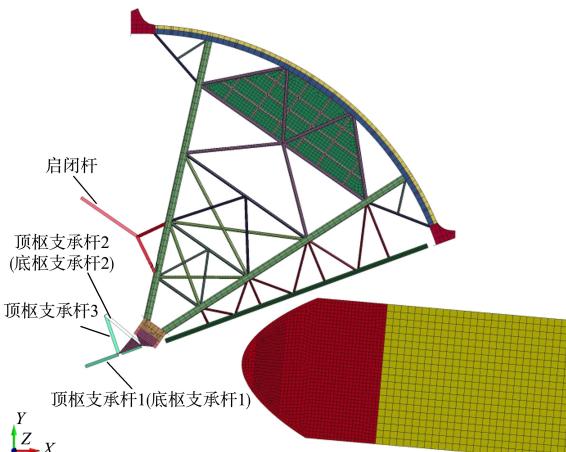


图 4 三角闸门与船舶撞击体系的有限元模型

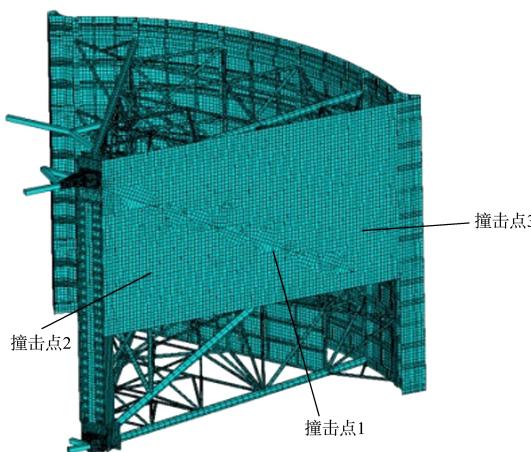


图 5 船舶撞击位置

采用 LS-DYNA 瞬态分析模块进行三角门防撞体系船舶撞击数值模拟时, 取计算工况为开门状

态, 此时三角门各扇闸门门体收入门库中, 挡水面板前后水位齐平, 面板前后的水平水压力相互抵消, 因此闸门主要受自身重力荷载和浮箱在水压力作用下所受的竖向浮力。为简化分析并直观了解 2 种防撞系统的耗能情况, 下面仅列出三角闸门受船舶撞击情况下顶、底枢水平支承杆的轴力变化情况, 其中, 为了减小顶枢轴套间的摩阻力对顶枢支承杆的扭转影响, 顶枢设计采用了三连杆布置体系, 分别标记为支承杆 1、2 和 3, 底枢支承杆为 2 根。船舶进、出闸室撞击到三角门防撞系统时的各计算结果控制值如表 4 所示。

表 4 船舶撞击时闸门顶、底枢主要支座杆件内力极值

杆件	压力/kN		降幅/%	拉力/kN		降幅/%
	传统	新型		传统	新型	
顶枢支承杆 1	0	0	0	2 121	1 885	11.1
顶枢支承杆 2	-3 339	-2 760	17.3	3 117	2 877	9.4
顶枢支承杆 3	-49	-39	20.4	39	32	17.9
底枢支承杆 1	-1 552	-1 330	14.3	0	0	0
底枢支承杆 2	-718	-625	13.1	1 320	951	28.0
启闭杆	-5 399	-4 947	8.4	3 376	2 645	21.7

从表 4 可以看出, 传统防撞系统下, 为防止三角闸门在开启过程中因发生扭转对顶枢支承杆 1 和 2 受力不利而增设的支承杆 3 在船舶撞击下内力变化最为剧烈, 相对于关门状态下或开门稳定状态下几乎不受力(不足 1 kN), 在受船舶撞击时, 杆件内力在 -50~40 kN 之间波动, 可见该顶枢支承杆 3 对防止闸门剧烈扭转可以起到一定的作用。对比传统防撞系统, 含有新型防撞系统的三角闸门各支承杆件反力峰值降低幅度在 8%~28%, 新型防撞系统防护效果更好。

5 结语

1) 分别对泡沫铝夹芯板上、下薄钢板厚度均为 3 mm, 泡沫铝厚度为 40、60、80 mm 的 3 组夹芯板进行撞击耗能分析, 结果表明: 随着泡沫铝厚度的增加, 除去泡沫铝外的三角闸门防撞系统各部件耗能从 328 kJ 逐步减小到 308 kJ 和 282 kJ, 泡沫铝吸收的能量占比越来越大, 由于泡沫铝优异的吸能特性, 能够减小防撞系统其他部件的损伤。