

弧形钢闸门支臂受冲击荷载的非线性动力分析

董静, 白宇航, 裴多菲, 张俊发

Nonlinear dynamic analysis of arc steel gate arms subject to impact load

DONG Jing, BAI Yuhang, PEI Duofei, ZHANG Junfa

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20231214002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

支铰与启闭杆对弧形闸门有限元计算影响分析

Finite element analysis of the influence of support hinges and operating rods on curved sluice gates
水利水电工程学报. 2024(4): 148 <https://doi.org/10.12170/20230909001>

水工闸门振动研究现状及发展趋势

Current research status and development trend of hydraulic gate vibration
水利水电工程学报. 2019(2): 55 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.008>

基于边界面的多隔舱筒形基础动力分析

Dynamic analysis of multi-compartment bucket foundation based on boundary model
水利水电工程学报. 2020(3): 114 <https://doi.org/10.12170/20190523001>

考虑翘曲及挤压影响的深孔闸门主梁正应力解析解

Analytical solution of positive stress for main beam of deep-hole gate considering effects by warpage and extrusion
水利水电工程学报. 2019(4): 116 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.04.016>

水下高耸薄墙爆破对紧邻钢管桩的动力影响

Influence of demolition blasting of underwater towering thin wall on dynamic characteristics of adjacent steel pipe pile
水利水电工程学报. 2023(3): 130 <https://doi.org/10.12170/20220105001>

内部充水钢围堰的结构安全稳定分析

Structural safety and stability analysis of internal water-filled steel cofferdam
水利水电工程学报. 2022(3): 127 <https://doi.org/10.12170/20211002003>



扫码进入官网, 阅读更多精彩内容



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20231214002

董静, 白宇航, 裴多菲, 等. 弧形钢闸门支臂受冲击荷载的非线性动力分析 [J]. 水利水运工程学报, 2025(1): 133-144. (DONG Jing, BAI Yuhang, PEI Duofei, et al. Nonlinear dynamic analysis of arc steel gate arms subject to impact load[J]. Hydro-Science and Engineering, 2025(1): 133-144. (in Chinese))

弧形钢闸门支臂受冲击荷载的非线性动力分析

董静¹, 白宇航¹, 裴多菲², 张俊发¹

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 中国能源建设集团陕西省电力设计院有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 为研究水工弧形钢闸门在正常运行工况时支臂受冲击作用下的动力响应问题, 预估闸门可能出现的破坏模式, 以某水电站的弧形钢闸门为研究对象, 采用非线性有限元方法模拟钢闸门在静水压力作用下, 支臂受浮木冲击的过程, 得到并分析弧形钢闸门支臂不同位置受冲击时的冲击力、位移及闸门整体的变形特征。结果表明, 闸门破坏过程为受冲击的支臂或其斜杆首先发生面外失稳, 随后靠近失稳支臂侧的闸门向铰支座方向移动, 导致另一支臂承担的水压荷载瞬间增大而被压溃, 最终导致闸门整体失稳破坏。随着浮木质量和冲击能量增加, 受冲击位置受到的力和位移随之增大。当冲击能量较小时, 即使支臂受冲击部位应力超过钢材屈服应力, 闸门仍具有一定的稳定性; 闸门支臂不同部位所能承受的最大冲击能量差异较大, 冲击支臂近铰支座处位置易引起闸门结构失稳破坏; 堰上水头越高, 闸门支臂受冲击时越容易失稳。研究结果可为闸门受冲击时的安全性和闸门较易失稳构件的评判提供参考。

关键词: 弧形钢闸门; 钢闸门支臂; 动力响应; 静水压力; 等效应力

中图分类号: TV663⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2025)01-0133-12

弧形闸门是水利水电枢纽工程泄水建筑物的重要组成部分, 由于其启闭方便、省时省力等特点而得到广泛应用^[1-3]。弧形闸门的运行状态不仅直接影响自身的适用性、安全性和耐久性, 而且会影响下游人民的生命财产及自身水利枢纽的安全^[4-6]。因此, 研究弧形闸门的动力特性及其在水流作用下的动力响应具有重要意义。国内外学者针对弧形闸门进行了广泛研究。Kim 等^[7]研究了闸门开启对其自振频率和水流速度的影响; Lian 等^[8]分析了泄洪过程中的弧形闸门振动过程, 揭示了诱发振动的新机制, 建立了考虑复杂负载和阻尼的理论模型; Lee 等^[9]提出了一种缓解闸门振动方法, 并通过试验与有限元分析结果验证了该方法减震的有效性; 曹青等^[10]采用有限元方法分析了关键参数对支臂承载力的影响规律, 结果表明支臂腹板高度对支臂空间屈曲荷载影响比其翼缘宽度的影响更明显; 李火坤等^[11]基于支臂屈曲的理论, 考虑周期性水荷载的影响, 提出了判断不稳定区域的边界条件; 庞崇安等^[12]利用 LS-DYNA 软件考虑流固耦合效应, 分析弧形闸门在水下爆破荷载作用下的动力响应, 研究表明闸门在不同蓄水及爆炸位时, 最大应力区域出现在闸门弧形面板、纵横梁和次横梁上; 张启灵等^[13]利用 ABAQUS 软件建立了弧形钢闸门模型, 采用时程曲线方法模拟爆炸冲击力荷载下闸门的动力响应, 结果表明水下不同爆破位置对闸门的破坏模式影响明显, 当爆炸源位于下门页前时, 爆炸点对上下支臂之间的面板结构影响最大, 支臂塑性变形区主要发生在支臂与梁系交汇处; 马斌等^[14]总结分析了现有闸门振动技术研究方法(包括原型观测、数值分析和试验研究)和稳定性研究现状, 提出了闸门振动急需解决的问题和未来研究方向; 潘锦江^[15]分析指出闸门振动通常与闸门开

收稿日期: 2023-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52109167); 陕西省教育厅专项科研计划项目(21JK0803); 陕西省科技创新团队项目(2022TD-01)

作者简介: 董静(1990—), 男, 江苏盐城人, 副教授, 主要从事结构抗震及水工沥青混凝土性能研究。

E-mail: skydongjing@xaut.edu.cn

度、门后淹没水跃、止水漏水、闸门底缘型式的影响等因素有关,从设计和管理角度探讨了防振措施。

综上所述,国内外学者的研究大多集中在弧形闸门的静力特性^[16-17]、动力稳定性分析^[18-19]及支臂的空间屈曲研究上^[20-21],而在某些特定情况下,露顶式弧形闸门建立于山区时可能会受到山区滚石的冲击威胁,或洪泛灾害等其他原因使闸门无法及时开启,导致闸门门顶过水时,闸门支臂可能会遭受漂浮物的冲击而损坏^[22-24]。目前,关于弧形闸门在外荷载冲击作用下的动力响应研究还不够充分,因此,有必要对弧形闸门的动力特性及其支臂在冲击作用下弧形闸门的动力响应进行深入研究。

为提高钢闸门的抗冲击安全性,完善水工结构抗冲击理论,本文采用数值分析方法^[25-26],考虑材料、几何和接触非线性,对某弧形钢闸门支臂受冲击作用下的动力响应展开分析,研究结构的破坏过程、位移和应力时程响应,研究结果可为防灾工程的设计提供一定参考。

1 计算模型与数值计算方法

1.1 模型及边界条件

弧形闸门为斜支臂双主横梁结构,主要包括:门页结构、主横梁体系、支臂结构及支铰结构。所建模型闸门孔口宽 12.3 m,高 6.3 m,闸门曲率半径为 7.5 m,门页厚 0.38 m,共由 9 个横梁和 7 个纵梁组成,主梁和纵梁形式为工字钢,次横梁为槽钢。采用 HyperMesh 软件建立弧形闸门的有限元模型,其中闸门面板、主横梁体系及支臂结构均采用四面体壳单元模拟,支铰结构采用六面体单元模拟。闸门有限元模型共有节点 375 268 个,单元总数为 357 354 个,其中壳单元总数为 342 074 个,实体单元总数为 15 280 个。由于门页结构和纵横梁为非主要冲击部位,故网格尺寸为 50 mm×50 mm,支臂体系网格尺寸为 10 mm×10 mm,弧形闸门有限元模型及网格划分见图 1。

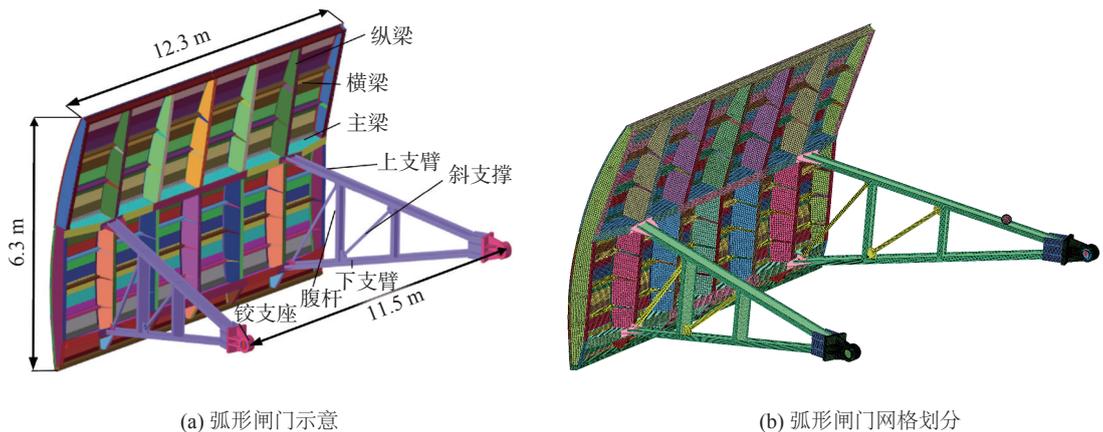


图 1 弧形闸门有限元模型
Fig. 1 Finite element model of the arc gate

支铰和支臂结构、支臂结构与门体结构、主横梁结构与面板结构之间的焊接连接,采用单面接触模拟,材料阻尼系数 VDC 为 20.00。弧形闸门与闸门内部钢板连接采用共节点方式连接。由于复杂情况下无法保证壳单元法向与接触法向一致,且在冲击过程中浮木与支臂间可能发生相对滑移,故采用自动面面接触模拟浮木与支臂接触时的力学行为。

闸门支臂端部为铰支座,因此模型中限制 x 、 y 、 z 向平动位移和绕 x 、 y 轴的转动。闸门支臂受冲击时处于关闭状态,且闸门两侧有侧轨支撑,底部安装有底槛,模型中通过限制闸门底部 y 向和两侧 z 向平动位移来模拟。此外,由于进行动力响应计算时,弧形闸门面板前存在静水压力,模型中通过将该荷载分层加载至弧形闸门面板上并添加重力场,以此模拟结构的初始受荷条件。

1.2 材料本构模型

对于弧形闸门钢材,适用的材料模型有分段线性塑性模型和塑性随动模型^[27-28]。早期闸门钢材大多选用 Q235 钢,本文考虑了闸门结构的材料和几何非线性,选择使用分段线性塑性模型来模拟钢材的应力-应变行为,如式(1)所示。按照文献^[29]的 Q235 钢材材性试验曲线,通过式(2)转化为材料的真实应力-应变曲线如图 2 所示,为了保证计算效率,本文选取多个关键点,采用多段线形式代替应力-应变的曲线。

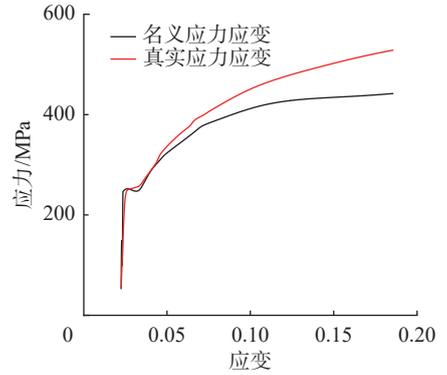


图2 Q235 钢材的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress strain curve for Q235 steel material

$$\sigma_y = \left[1 + (\varepsilon'/C)^{\frac{1}{P}} \right] \left(\sigma_0 + f_n(\varepsilon_{\text{eff}}^P) \right) \quad (1)$$

$$\sigma_n = \sigma(1 + \varepsilon), \quad \varepsilon_n = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2)$$

式中: ε' 为应变率; C 和 P 为应变参数; σ_0 为常应变率处的屈服应力; $f_n(\varepsilon_{\text{eff}}^P)$ 为基于有效塑性应变的硬化函数; σ_n 、 σ 分别为材料的真实和工程应力, ε_n 、 ε 分别为其相应的材料真实和工程应变。

浮木形状有两种,分别为球体和圆柱体,其中球体冲击支臂腹板,直径为 240 mm;圆柱形浮木冲击闸门支臂翼缘,其直径为 200 mm,长度为 1 500 mm,浮木模型采用分段线性弹塑性材料模型。钢材本构模型和浮木本构模型主要参数见表 1。

表1 钢材本构模型和浮木本构模型材料参数

Tab. 1 Material parameters for the steel constitutive model and driftwood constitutive model

钢材材料参数					浮木材料参数				
$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	E/Pa	ν	f_y/Pa	C	P	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	E/Pa	ν	f_y/Pa
7 850	2.21×10^{11}	0.3	2.65×10^8	40 000	5	351~774	1.64×10^{10}	0.027	3.2×10^7

注: ρ 为密度; E 为弹性模量; ν 为泊松比; f_y 为屈服强度; C 和 P 为应变参数。

2 工况分析

本文计算主要包括两类共 6 种工况,在位置 1~4(见图 3(a))采用球形浮木冲击闸门支臂腹板,分析不同位置受冲击荷载作用下的结构动力响应。此外,实际情况中存在浮木击中位置 3 处翼缘的情况,故在位置 3 处增加设置圆柱形浮木冲击支臂翼缘,研究其动力响应。支臂受冲击后的动力响应主要与浮木的冲击能量有关,计算中主要通过改变浮木质量来改变其冲击能量。

可根据动能定理确定浮木落到支臂的冲击速度:

$$mgh = mv_1^2/2 - mv_0^2/2 \quad (3)$$

式中: m 为浮木质量; g 为重力加速度; h 为浮木下落高度; v_0 为给定的浮木初始速度,一般为 0,因此其竖向速度 v_1 为: $v_1 = \sqrt{2gh}$ 。

闸门洪水溢顶时,模型等同于矩形薄壁堰,则其泄流流量为:

$$Q = m_0 b H \sqrt{2gH} \quad (4)$$

则浮木的水平速度 v_2 为:

$$v_2 = Q/A = Q/(0.668bH) = 0.674 \sqrt{2gH} \quad (5)$$

式中: Q 为流量; m_0 为流量系数,取值范围为 0.41~0.48^[30],本文取为 0.45; b 为断面宽度; H 为堰上水头; A 为闸门顶部位置的水流量截面积。根据式(4)和(6)可得浮木的总速度为: $v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$ 。

浮木冲击支臂位置 1~4 处工况相应的冲击能见表 2 和表 3。

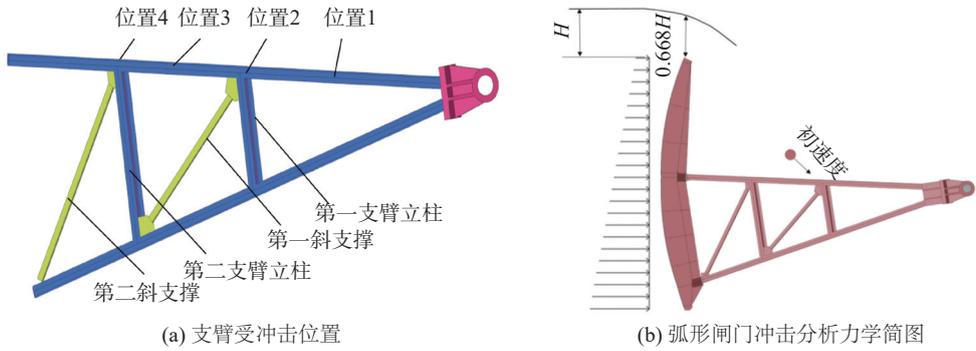


图 3 弧形闸门支臂冲击工况及计算简图

Fig. 3 Impact conditions and schematic calculation of the arc gate support arms

表 2 位置 1~4 处浮木冲击工况 (腹板位置)

Tab. 2 Driftwood impact conditions at locations 1~4 (web position)

冲击位置	浮木质量/kg	速度/(kg/m)	冲击能/J	冲击位置	浮木质量/kg	速度/(kg/m)	冲击能/J
位置1	25	7.73	747	位置3	100	7.61	2 893
	50		1 494		200		5 787
	75		2 241		400		11 573
	100		2 988		600		17 359
	150		4 482		800		23 146
位置2	100	7.65	2 929	位置4	100	7.56	2 857
	200		5 858		200		5 715
	400		11 716		400		11 430
	500		14 645		600		17 145
	600	17 574		800	22 860		

表 3 位置 3 处浮木冲击工况 (翼缘位置)

Tab. 3 Driftwood impact condition at location 3 (flange position)

冲击位置	堰上水头/mm	浮木质量/kg	竖向速度/(m/s)	水平速度/(m/s)	总速度/(m/s)	冲击能/J
位置3	500	600	8.23	2.11	8.49	21 635
	900	600	8.80	2.98	9.29	25 911

3 计算结果分析

首先利用 Ls-Dyna 的隐式分析程序计算得出闸门在各工况水头(工况 1~4 为 6.3 m, 工况 5 为 6.8 m, 工况 6 为 7.2 m)下形成的应力和应变场, 将其导入显式分析程序并保持水荷载作为初始条件, 在此条件下对闸门模型进行冲击分析。同时为保证模型计算精度和计算效率, 计算总时间设置为 0.6 s, 时间增量为固定增量步 0.006 s。

3.1 模型有效性分析

浮木冲击闸门支臂结构过程中的能量主要转换为: 浮木剩余动能、内能及变形能, 钢闸门结构的动能、内能和变形能, 浮木与闸门接触产生的滑移能, 沙漏能。以 100 kg 的浮木冲击位置 3 为例, 钢闸门受冲击后的能量变化曲线如图 4 所示。

由图 4 可知, 冲击后系统总能量在 4 500 J 处波动。滑移能、沙漏能在允许范围内, 最大值分别为 9 和 97 J, 占相应时刻总能量的 0.2% 和 2.2%。因此本文所采用的网格类型、分布及其密度均满足精度要求。

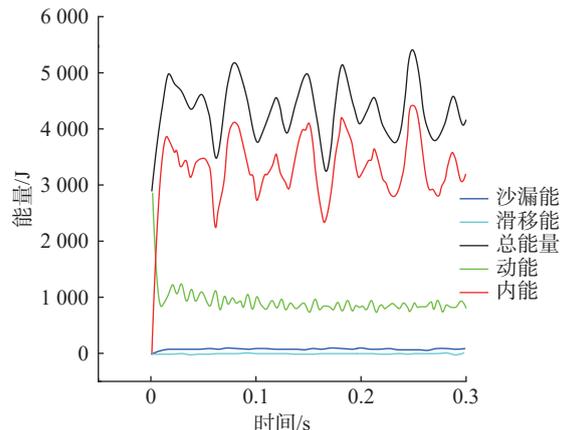


图 4 冲击过程能量变化曲线

Fig. 4 Energy variation curve during impact process

3.2 不同冲击工况下弧形闸门的动力响应

3.2.1 受冲击位置 1 图 5 给出了支臂位置 1 处受冲击时结构的位移与应力变化规律。由图 5 可知,受冲击位置的位移幅值随浮木质量的增加而增加,其主要原因是:在冲击速度不变的情况下,增大浮木质量可明显增加浮木的冲击能量,其值越大引起结构的动力响应越明显。此外,结构受冲击后,受冲击位置应力以波的形式沿支臂传播。由图 5(a)可知,受冲击位置位移波动周期会随着浮木冲击质量的增加而增加,原因为冲击能越大,受冲击位置局部区域越早屈服或屈服区域扩大,从而引起结构的阻尼增大;当浮木质量为 150 kg 时,受冲击的支臂在面板水压力作用下,支臂持续受压屈曲变形,导致受冲击位置的竖向位移出现无穷大情况,这表明支臂已失稳。由图 5(b)可知,随着冲击质量的增加,受冲击位置的应力峰值呈现增长趋势,且均在 3 ms 时刻达到峰值,当浮木质量较小时,支臂受冲击后仍能在较高的应力下保持稳定,如 25 kg 浮木冲击位置 1 时,结构受冲击位置的等效应力虽已超过钢材的屈服应力,但结构并未发生失稳;而当采用 150 kg 浮木冲击时,受冲击位置等效应力超过 500 MPa,由此引起支臂受冲击位置产生较大变形,最终在显著的面板水压力 $P-\Delta$ 效应下,结构失稳破坏。

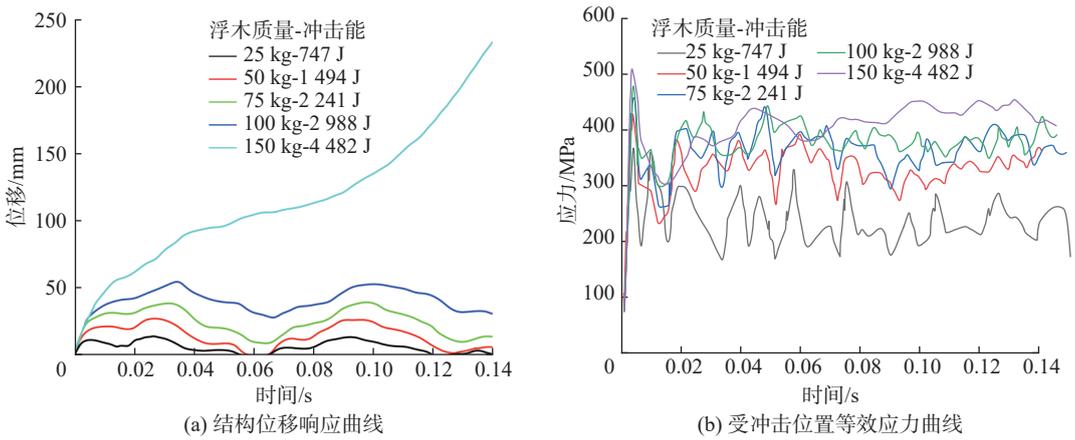
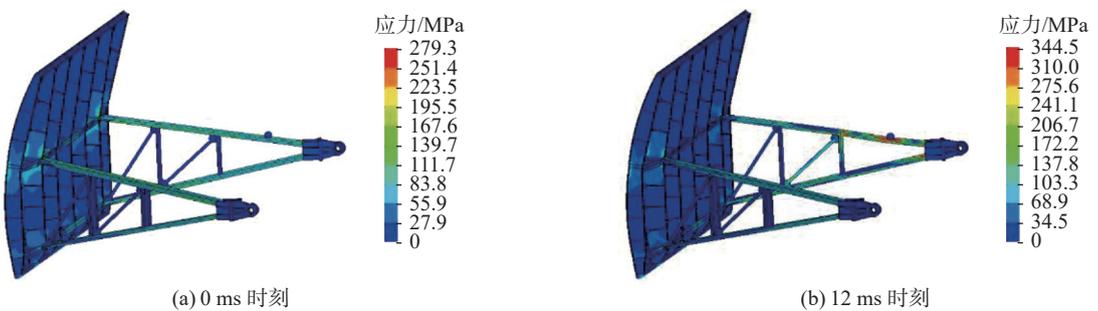


图 5 受冲击位置 1 的结构位移和应力响应分析

Fig. 5 Structural displacement and stress response analysis at the impacted position 1

图 6 给出了浮木质量为 150 kg 时,不同时刻冲击位置 1 的闸门结构 Mises 应力云图及结构变形特征。由图 6 可知,初始状态 0 ms 时刻到浮木与支臂相撞的 12 ms 时刻,受冲击位置的局部应力较大,已超过钢材的屈服应力 265 MPa,而且随着时间推移,在面板水压力作用下,冲击位置的位移会沿着冲击方向增大,受冲击支臂绕铰支座逆时针转动;约在 114 ms 时刻,上支臂靠近首个立柱位置的翼缘应力达到 436 MPa,该处出现塑性铰;随着铰支座转动角度增大,下支臂近铰支座处发生弯曲,该处翼缘应力超过钢材屈服强度。随着受冲击支臂结构变形增大,另一支臂承担荷载增大,252 ms 时刻另一支臂第三节上下支臂达到屈服强度,发生反方向弯曲屈曲,产生塑性铰,水压荷载作用下该铰转动,该支臂的第三节上下支臂在靠近第二个支臂立柱处发生相反方向的变形;最终,在面板水压荷载及支臂横向变形联合作用下迅速变形,导致支臂结构完全失稳破坏。综上可知,浮木冲击位置 1 时,结构由于近铰支座支臂发生变形,引起结构显著的 $P-\Delta$ 效应,最终导致结构失稳破坏。



(a) 0 ms 时刻

(b) 12 ms 时刻

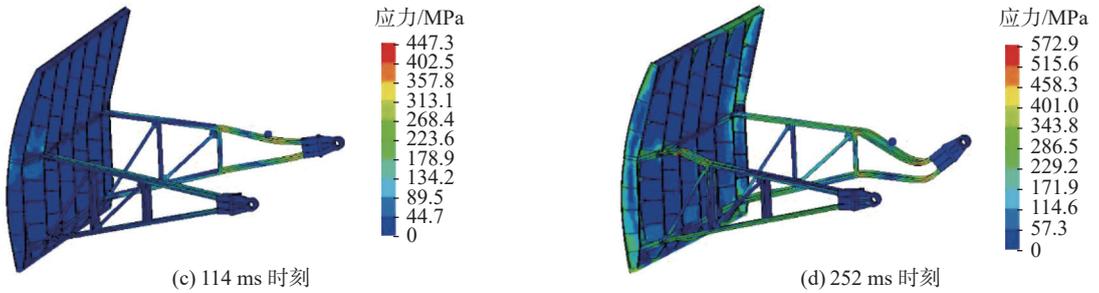


图 6 150 kg 浮木冲击位置 1 时闸门结构 Mises 应力云图

Fig. 6 Mises stress contour map of the gate structure when impacted by 150 kg driftwood at position 1

3.2.2 受冲击位置 2 图 7 为位置 2 处受冲击时的位移和等效应力时程曲线, 与冲击位置 1 相似, 支臂出现失稳现象时, 受冲击位置的位移出现无穷大情况。但对于受冲击位置 2, 结构失稳时所需的浮木冲击能较大, 当浮木质量小于 500 kg 时, 受冲击位置局部应力均超过钢材屈服应力, 但未引起结构整体失稳。当浮木质量为 600 kg 时, 结构出现整体失稳现象, 但由图 7(b) 可知, 随着冲击质量的增加, 受冲击位置的应力峰值并未呈现增长趋势, 其原因可能是位置 2 处存在支臂立柱和斜杆, 冲击之后的应力会传递至支臂及斜杆处, 导致该处应力出现卸载现象。

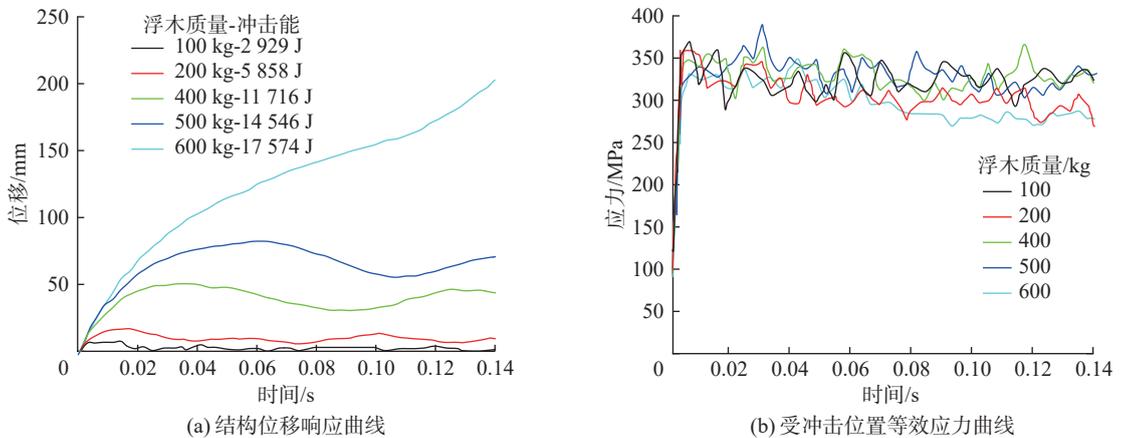


图 7 受冲击位置 2 的结构位移和应力响应分析

Fig. 7 Structural displacement and stress response analysis at the impacted position 2

图 8 给出了位置 2 处的斜杆跨中应力时程曲线。由图 8 可知, 浮木物质量从 100 kg 增大至 600 kg 时, 等效应力峰值从 266 MPa 增加到 520 MPa, 对应的时刻分别为 6 和 228 ms。后者所需时间明显较长, 其原因可能是, 当采用 600 kg 的浮木冲击支臂位置 2 时, 冲击后由于该处斜杆发生面外变形, 导致支臂的承载力下降, 在水压荷载的联合作用下, 支臂斜杆持续变形引起跨中应力增大。

为了解浮木冲击位置 2 时闸门的失稳变形特征, 图 9 给出了 600 kg 浮木冲击位置 2 处的 Mises 应力云图及失稳变形特征。由图 9 可知, 0 ms 时刻开始, 受冲击位置工字钢的腹板与翼缘处应力增大

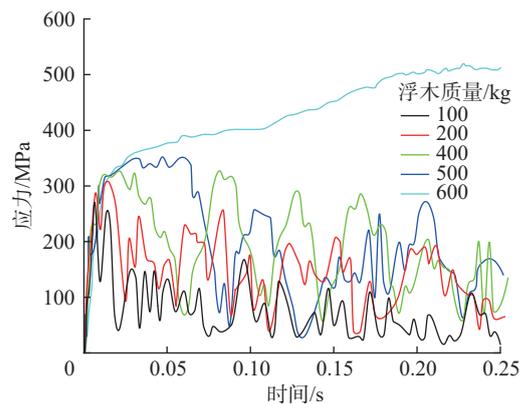


图 8 位置 2 处斜支撑跨中等等效应力时程曲线

Fig. 8 Time history curve of equivalent stress at the mid-span of diagonal bracing at location 2

并产生沿冲击方向的位移(负 y 方向), 冲击支臂绕铰支座逆时针旋转, 在 102 ms 时刻, 斜杆的跨中位置应力达到 413 MPa, 并且产生明显的面外变形特征, 随后在水压荷载作用下, 冲击位置沿冲击方向位移迅速增加, 使得另一支臂承担水压荷载逐渐增大; 在 300 ms 时刻, 另一支臂第三节上下支臂的跨中位置产生较大应力, 应力值约为 516 MPa, 且二者产生反方向的弯曲变形, 随后在 402 ms 时刻, 在持续水压作用下, 另一支臂近面板的上下支臂被压溃, 门体出现向铰支座方向移动趋势; 在 498 ms 时刻, 另一支臂与门体发生接触碰撞, 此时闸门已经失去应有功能, 发生整体失稳破坏。综上可知, 在位置 2 处冲击支臂时, 斜杆发生面外屈曲失稳, 导致结构承载力下降, 是其整体失稳破坏的主要原因。

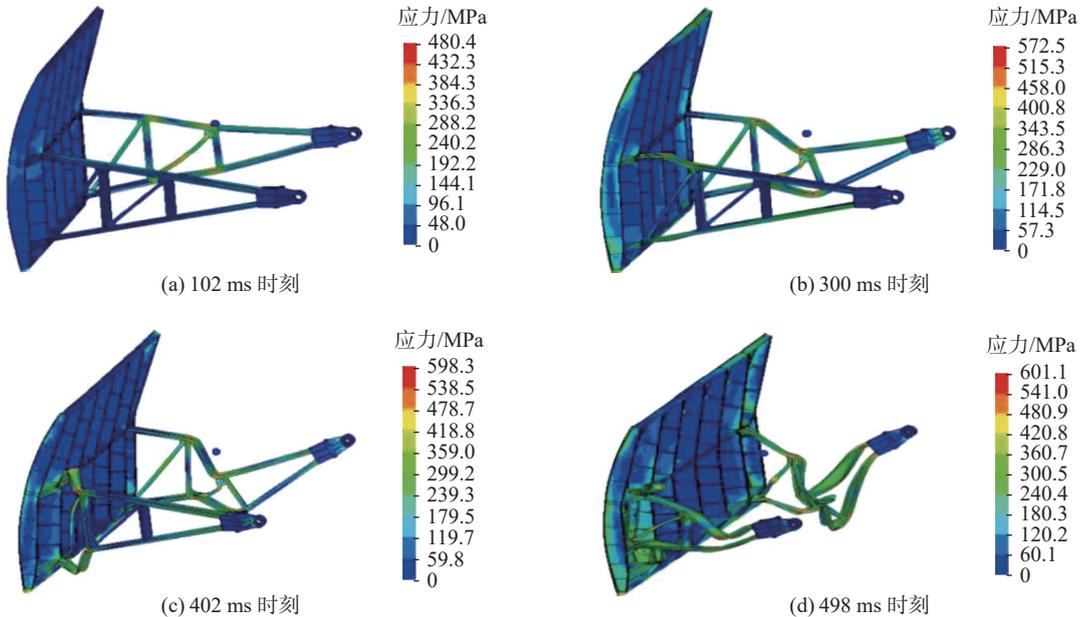


图 9 600 kg 浮木冲击位置 2 时闸门结构的 Mises 应力云图

Fig. 9 Mises stress contour map of the gate structure when impacted by 600 kg driftwood at position 2

3.2.3 受冲击位置 3 图 10 为位置 3 处受冲击时的位移曲线和等效应力曲线。由图 10 可知, 结构位移和应力响应总体上与冲击位置 1 时的响应规律相似, 但结构失稳时所需的浮木冲击能远高于位置 1。图 10(c)和(d)还给出了当水头高出闸门顶部 500 和 900 mm, 600 kg 浮木冲击位置 3 处翼缘时, 闸门结构的位移和应力响应曲线。可见, 当堰上水头由 500 mm 增加至 900 mm 时, 浮木冲击相同位置的支臂翼缘, 后者位移增长更加迅速, 在 0.3 s 时刻位移分别达到 1 390 和 2 380 mm, 这表明堰上水头越高, 钢闸门支臂越容易失稳。

为详细了解位置 3 处弧形闸门的应力及应变特征, 图 11 给出了 800 kg 浮木冲击支臂位置 3 时的 Mises 应力云图。由图 11 可知, 0 ms 时刻开始, 受冲击位置工字钢的腹板与翼缘处应力增大; 在 150 ms 时刻, 由于闸门底槛设置了沿 y 方向的位移约束, 因此在冲击压力作用下, 整个支臂类似于简支梁受力模式, 观察到位置 3 的支臂跨中及位置 4 处斜支撑跨中均出现了明显的受压屈曲变形, 其应力均超过了钢材的屈服应力。此时在静水压力作用下, 冲击位置沿冲击方向位移迅速增加, 整个闸门以另一支臂铰为转动中心, 产生一定的扭转变形, 使得另一支臂承担的水压荷载逐渐增大, 改变了该支臂的设计受力模式; 在 348 ms 时刻, 另一支臂第三节上下支臂的跨中位置产生较大应力, 应力值约为 539 MPa, 且二者在静水压力作用下产生反方向弯曲变形, 此时冲击支臂发生明显的面外变形; 在 450 ms 时刻, 两支臂最终在静水压力作用下发生面外失稳破坏。

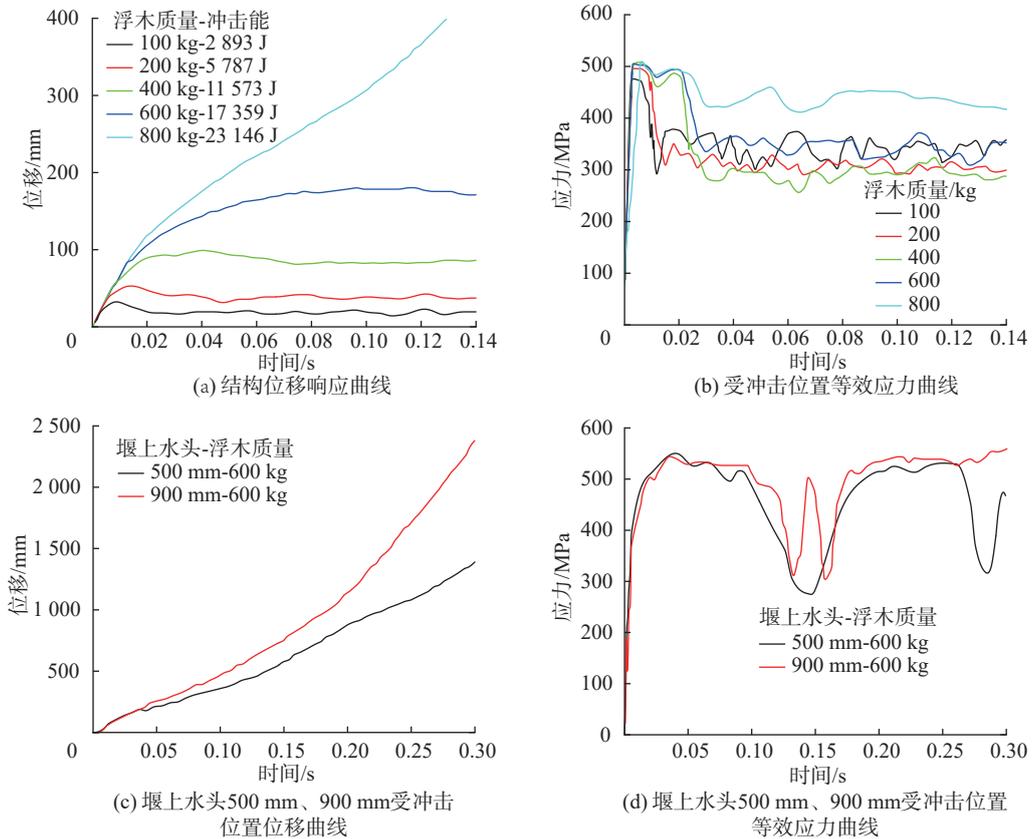


图 10 受冲击位置 3 的结构位移和应力响应分析

Fig. 10 Structural displacement and stress response analysis at the impacted position 3

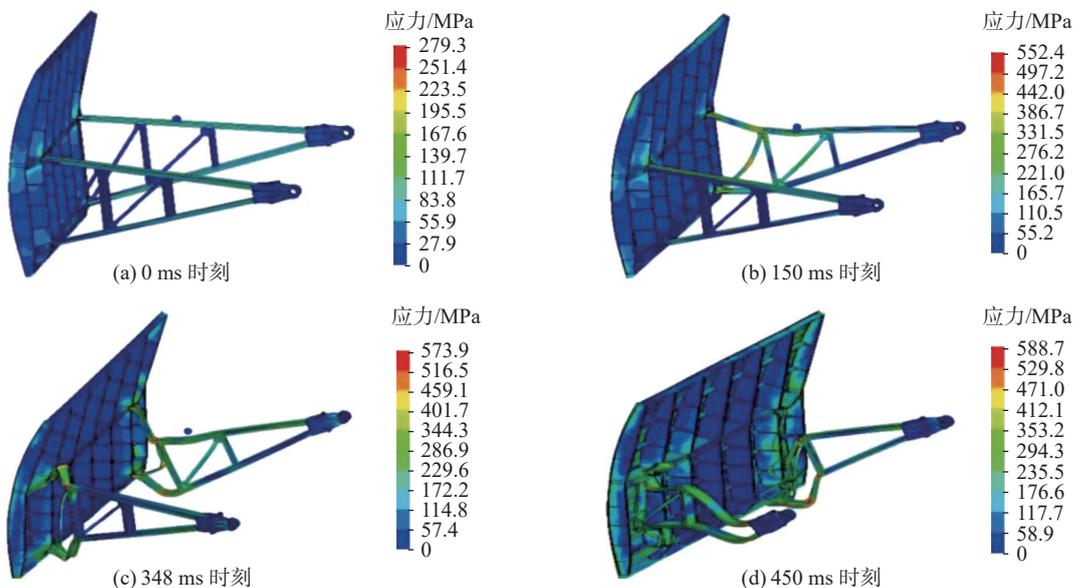


图 11 800 kg 浮木冲击位置 3 时闸门结构的 Mises 应力云图

Fig. 11 Mises stress contour map of the gate structure when impacted by 800 kg driftwood at position 3

3.2.4 受冲击位置 4 图 12 为位置 4 处受冲击时的位移和等效应力时程曲线。由图 12 可知, 该受冲击位置结构的动力响应与冲击位置 2 相似, 均为在冲击荷载作用下, 连接处刚度及承载力较大, 引起相应斜支撑

受压屈曲变形,导致结构承载力降低,从而引发结构失稳破坏,但支臂失稳时所需浮木的冲击能远高于后者。总体上,与前 3 种冲击位置相比,浮木冲击位置 1 时最容易引起结构整体失稳。

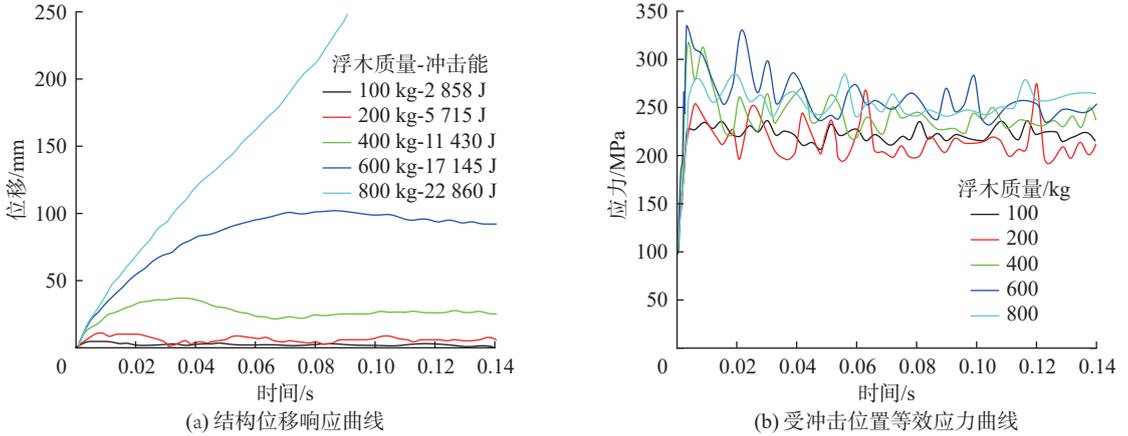


图 12 受冲击位置 4 的结构位移和应力响应分析

Fig. 12 Structural displacement and stress response analysis at the impacted position 4

图 13 为位置 4 处斜支撑跨中的等效应力时程曲线,当 200 kg 浮木冲击支臂位置 4 时,该处斜杆跨中应力已超过钢材屈服应力,其等效应力最大达到 300 MPa。当用 800 kg 浮木冲击支臂位置 4 时,该处等效应力达到 517 MPa,相应的发生时刻分别为 9 和 180 ms,与冲击位置 2 相似,后者发生的时间较晚,主要是由于斜杆失稳后,静水压力作用下导致该处支撑的变形持续增大,导致其应力逐渐增大并达到峰值。

为详细了解浮木冲击位置 4 时弧形闸门遭受破坏的应力应变特征,图 14 给出了 800 kg 浮木冲击位置 4 处的 Mises 应力云图及失稳变形特征。由图 14 可知,浮木冲击位置 4 时,该部位的工字钢腹板与翼缘应力增大,位移沿冲击方向增大,冲击支臂绕铰支座逆时针转动,在 144 ms 时刻,第二斜杆跨中位置应力值达到 480 MPa,产生弯曲变形,第二斜杆首先失稳,同时,受冲击支臂第三节上下支臂的近立柱处钢材发生屈服,进入塑性工作状态;在水压荷载作用下,受冲击位置位移迅速增加,闸门绕另一支臂铰支座扭转变形,使该支臂承担水压荷载逐渐增大;约在 240 ms 时刻,另一支臂第三节上下支臂的跨中位置的应力值达到 544 MPa,且产生反方向变形,上支臂向上、下支臂向下凸起;在 408 ms 时刻,靠近闸门主梁的支臂部分结构已压溃,失去承载能力;456 ms 时刻,整个支臂失稳已完全失去承载和挡水能力。

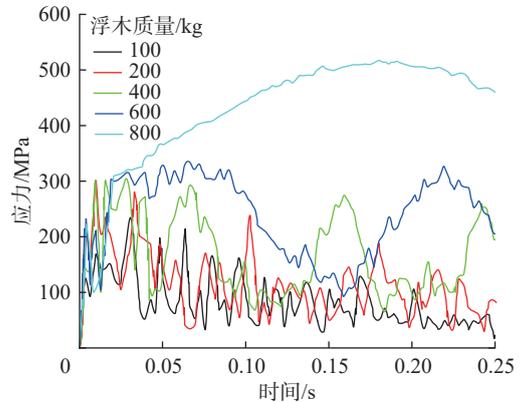
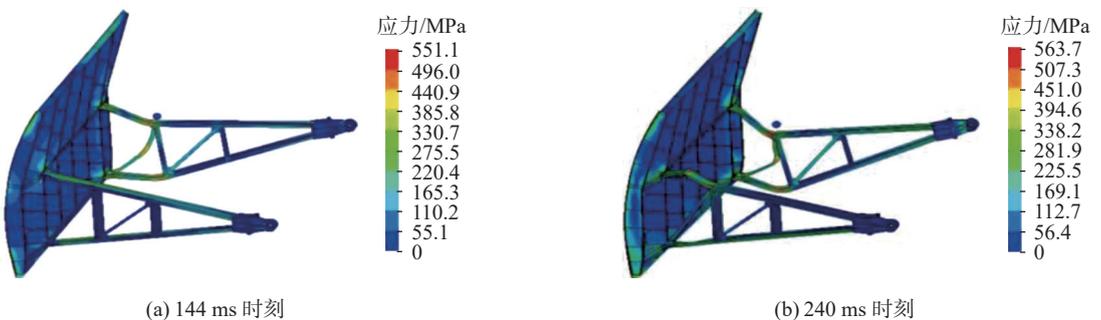


图 13 第二斜支撑跨中等效应力时程曲线

Fig. 13 Time history curve of equivalent stress at the mid-span of the second diagonal bracing



(a) 144 ms 时刻

(b) 240 ms 时刻

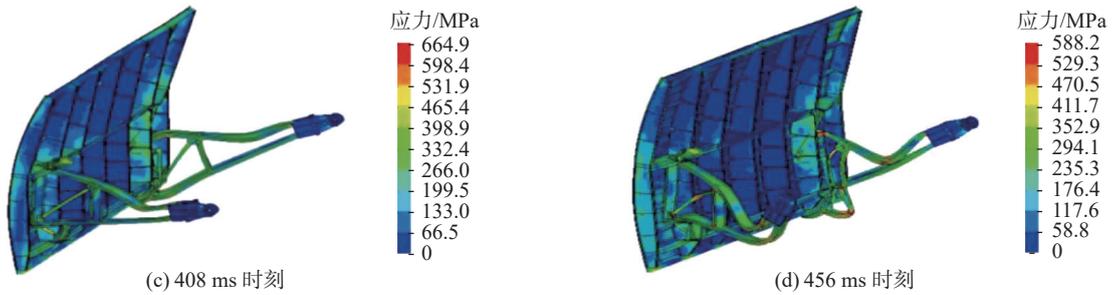


图 14 800 kg 浮木冲击位置 4 时闸门结构的 Mises 应力云图

Fig. 14 Mises stress contour map of the gate structure when impacted by 800 kg driftwood at position 4

4 结 语

本文采用非线性方法研究了弧形闸门支臂受浮木冲击作用时的动力响应,获得了结构的破坏过程、位移和应力等时程响应。主要结论如下:

(1)受冲击时的浮木质量越大,闸门越容易失稳破坏;当浮木质量较小时,弧形闸门支臂受冲击部位应力即使超过钢材屈服应力,但闸门仍可保持一定的稳定性;受冲击位置的位移峰值和残余变形会随浮木质量的增加而增加,受冲击位置位移峰值增加,震荡幅度和震荡周期也会增加。

(2)闸门支臂受冲击荷载作用下,其破坏过程一般为:受冲击的支臂或其斜杆首先发生大变形,在静水压力作用下,靠近失稳支臂侧的闸门结构向铰支座方向移动,另一支臂承担的水压荷载瞬间增大,导致该侧支臂被压溃,最终出现闸门结构整体失稳破坏。

(3)支臂近铰处位置为此类弧形闸门受冲击荷载薄弱点,在闸门设计阶段,建议在该处增设斜支撑与支臂立柱以提高结构稳定性。

参 考 文 献:

- [1] 严根华, 阎诗武. 弧形闸门结构的动力可靠性及抗振设计[J]. 水利水运科学研究, 2000(1): 8-13. (YAN Genhua, YAN Shiwu. Dynamic reliability and anti-vibration design of radial gates of outlets in dams[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 2000(1): 8-13. (in Chinese))
- [2] 严根华. 水动力荷载与闸门振动[J]. 水利水运工程学报, 2001(2): 10-15. (YAN Genhua. Hydrodynamic load and gate's vibration[J]. Hydro-Science and Engineering, 2001(2): 10-15. (in Chinese))
- [3] 李典庆, 张圣坤, 周建方. 现役水工钢闸门结构可靠性鉴定时荷载取值分析[J]. 水利水运工程学报, 2003(1): 67-70. (LI Dianqing, ZHANG Shengkun, ZHOU Jianfang. Load value analysis for reliability assessment of existing hydraulic steel gate structures[J]. Hydro-Science and Engineering, 2003(1): 67-70. (in Chinese))
- [4] CAI Y F, HAN Y F. Research on the radial gate fluid-structure coupling of hydraulic steel gate[J]. Applied Mechanics & Materials, 2015, 733: 468-471.
- [5] 张维杰, 严根华, 陈发展, 等. 深孔弧形闸门静动力特性及流激振动[J]. 水利水运工程学报, 2016(2): 111-119. (ZHANG Weijie, YAN Genhua, CHEN Fazhan, et al. Static and dynamic characteristics of high pressure radial gate and its flow-induced vibration[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(2): 111-119. (in Chinese))
- [6] 奚肖亚, 刘海祥, 叶小强, 等. 划子口河闸弧形钢闸门三维有限元分析与安全评估[J]. 水利水运工程学报, 2012(5): 36-41. (XI Xiaoya, LIU Haixiang, YE Xiaoqiang, et al. Three dimensional finite element analysis and reliability of radial steel gate for Huazikou River sluice[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(5): 36-41. (in Chinese))
- [7] KIM N G, CHO Y, LEE K B. Flow-induced vibration and flow characteristics prediction for a sliding roller gate by two-

- dimensional unsteady CFD simulation[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31(7): 3255-3260.
- [8] LIAN J J, CHEN L, MA B, et al. Analysis of the cause and mechanism of hydraulic gate vibration during flood discharging from the perspective of structural dynamics[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(2): 629.
- [9] LEE S O, SEONG H, KANG J W. Flow-induced vibration of a radial gate at various opening heights[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2018, 12(1): 567-583.
- [10] 曹青, 才君眉, 王光纶. 弧形钢闸门支臂的空间屈曲荷载影响因素的研究[J]. 水力发电, 2002(1): 33-36, 68. (CAO Qing, CAI Junmei, WANG Guanglun. Study on the affecting factors on the spatial bending load of the arm of steel arch-gate[J]. *Water Power*, 2002(1): 33-36, 68. (in Chinese))
- [11] 李火坤, 练继建. 偏心荷载作用下弧形闸门支臂的动力稳定性研究[J]. 南昌大学学报(工科版), 2006, 28(1): 72-78. (LI Huokun, LIAN Jijian. Research on the dynamic stability of arms in the radial gate under eccentric loading[J]. *Journal of Nanchang University (Engineering & Technology)*, 2006, 28(1): 72-78. (in Chinese))
- [12] 庞崇安, 王震. 大型弧形闸门的水下爆破冲击荷载及动力响应分析[J]. 水力发电, 2017, 43(6): 80-84, 114. (PANG Chong'an, WANG Zhen. Analysis on underwater blasting shock loading and dynamic response of large scale radial gate[J]. *Water Power*, 2017, 43(6): 80-84, 114. (in Chinese))
- [13] 张启灵, 李端有, 周武. 水下爆破荷载作用下弧形闸门的塑性变形和位移[J]. 水力发电学报, 2012, 31(4): 194-200. (ZHANG Qiling, LI Duanyou, ZHOU Wu. Plastic deformation and displacement of radial gate experiencing underwater explosion shock loading[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(4): 194-200. (in Chinese))
- [14] 马斌, 郭乙良. 水工闸门振动研究现状及发展趋势[J]. 水利水运工程学报, 2019(2): 55-64. (MA Bin, GUO Yiliang. Current research status and development trend of hydraulic gate vibration[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2019(2): 55-64. (in Chinese))
- [15] 潘锦江. 闸门振动问题探讨[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(6): 36-39. (PAN Jinjiang. Discussion on gate vibration[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2001, 21(6): 36-39. (in Chinese))
- [16] 方致远, 向衍. 弧形钢闸门三维有限元优化分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(7): 182-185. (FANG Zhiyuan, XIANG Yan. Three-dimensional finite element optimization analysis of radial steel gate[J]. *Water Resources and Power*, 2017, 35(7): 182-185. (in Chinese))
- [17] 肖鑫明, 桂林. 表孔弧形闸门静力数值模拟[J]. 水电能源科学, 2020, 38(3): 164-167. (XIAO Xinming, GUI Lin. Numerical simulation of static stress of crest outlet in radial gate[J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38(3): 164-167. (in Chinese))
- [18] 丁峰, 曹海瑞, 周胜. 基于 ANSYS 的弧形闸门支臂屈曲分析研究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(2): 119-122, 127. (DING Feng, CAO Hairui, ZHOU Sheng. ANSYS-based study on buckling analysis of ally arm for radial gate[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2016, 47(2): 119-122, 127. (in Chinese))
- [19] 张雪才, 陈丽晔, 姚宏超, 等. 弧形闸门支臂结构空间有限元分析原则研究[J]. 水力发电, 2021, 47(7): 73-82. (ZHANG Xuecai, CHEN Liye, YAO Hongchao, et al. Research on spatial finite element analysis principle of radial gate arm structure[J]. *Water Power*, 2021, 47(7): 73-82. (in Chinese))
- [20] 吴思远, 王正中, 徐超, 等. 基于特征灵敏度优化的弧形闸门动力分析模型[J]. 水力发电学报, 2017, 36(12): 61-68. (WU Siyuan, WANG Zhengzhong, XU Chao, et al. Dynamic analysis models for radial gates based on eigen-sensitivity optimization[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(12): 61-68. (in Chinese))
- [21] 牛志国, 李同春, 赵兰浩, 等. 弧形闸门参数振动的有限元分析[J]. 水力发电学报, 2008, 27(6): 101-105. (NIU Zhiguo, LI Tongchun, ZHAO Lanhao, et al. Finite element analysis of parametric vibration of radial gate[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2008, 27(6): 101-105. (in Chinese))
- [22] 夏念凌. 水工闸门事故实例分析[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1994. (XIA Nianling. Case analysis of hydraulic gate accident[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1994. (in Chinese))
- [23] 杨志泽, 胡木生, 李小勇, 等. 现役水工钢闸门安全度评估方法研究[J]. 水电能源科学, 2016, 34(2): 169-172. (YANG Zhize, HU Musheng, LI Xiaoyong, et al. Safety evaluation method research of existing hydraulic steel gate[J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(2): 169-172. (in Chinese))
- [24] 姜树海, 范子武. Bayes 方法在水工泄洪闸门事故率分析中的运用[J]. 水利学报, 2006, 37(8): 945-949. (JIANG Shuhai, FAN Ziwu. Application of Bayesian approach to accident rate analysis of outlet gates[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,

- 2006, 37(8): 945-949. (in Chinese))
- [25] 邱德修, 朱召泉. 弧形钢闸门主框架的动力稳定分析[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(3): 49-52. (QIU Dexiu, ZHU Zhaoquan. Dynamic stability analysis of main frame of radial steel gates[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(3): 49-52. (in Chinese))
- [26] 章继光, 山田孝一郎, 松本芳纪. 弧形钢闸门支臂的空间屈曲荷载研究[J]. 水利学报, 1992(6): 67-73, 80. (ZHANG Jiguang, YAMADA Koichiro, MATSUMOTO Yoshiki. Research on spatial buckling load of radial steel gate arm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992(6): 67-73, 80. (in Chinese))
- [27] 孙运慧. 飞行器冲击作用下凯威特型单层球面网壳动力响应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017. (SUN Yunhui. Dynamic response of Kiewitt single-layer reticulated dome under aircraft impact[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017. (in Chinese))
- [28] 沙宇. 基于材料塑性行为的随动强化模型的有限元分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2008. (SHA Yu. Finite element analysis on the fatigue crack growth parameter of high strength aluminum alloy based on the material's kinematic hardening model[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2008. (in Chinese))
- [29] 康科武. 中性盐雾环境锈蚀钢结构节点抗震性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016. (KANG Kewu. Experimental study on earthquake resistance of corroded steel beam-to-column connections under neutral salt spray corrosion environment[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016. (in Chinese))
- [30] 张月霞, 冯宇, 易文敏, 等. 水力翻板闸门流量系数的试验研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(5): 220-225. (ZHANG Yuexia, FENG Yu, YI Wenmin, et al. Experimental study on the discharge coefficient of hydraulic flap gate[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(5): 220-225. (in Chinese))

Nonlinear dynamic analysis of arc steel gate arms subject to impact load

DONG Jing¹, BAI Yuhang¹, PEI Duofei², ZHANG Junfa¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. China Energy Engineering Group Shaanxi Electric Power Design Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: To investigate the dynamic response of the support arms of hydraulic arc steel gates under impact loads during normal operation conditions and to predict possible failure modes, an arc steel gate from a certain hydropower station was selected as the research object. The nonlinear finite element method was used to simulate the process of the support arms of the steel gate being impacted by floating debris under hydrostatic pressure, obtaining and analyzing the impact force, displacement, and overall deformation characteristics of different positions of the arc steel gate support arms. The results show that the gate failure process begins with out-of-plane buckling of the impacted support arms or their diagonal bars, followed by the movement of the gate towards the hinge support on the side close to the unstable support arm, causing the hydrostatic load borne by another support arm to instantaneously increase and be crushed, ultimately leading to the overall instability and failure of the gate. With the increase in the mass and impact energy of the floating debris, the force and displacement experienced by the impact position increase accordingly. With low impact energy, even if the stress at the impacted part of the support arm exceeds the yield stress of the steel, the gate still has a certain degree of stability; the maximum impact energy that different parts of the gate arm can withstand varies significantly, and the position of the impacted arm near the hinge support is prone to cause structural instability and failure of the gate; the higher the head of water above the weir, the easier it is for the gate arm to become unstable when impacted. The research results can provide a reference for the safety assessment when the gate is impacted and for identifying the components of the gate most prone to instability.

Key words: arc steel gate; steel gate support arm; dynamic response; hydrostatic pressure; equivalent stress