



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403589

引用格式:司才龙,贾治元,贡力.冰-水耦合作用下流冰对闸墩的撞击破坏力学特性响应[J].科学技术与工程,2025,25(7):2943-2950.

Si Cailong, Jia Zhiyuan, Gong Li. Mechanical characteristics of impact damage of flowing ice on gate piers under ice-water coupling[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(7): 2943-2950.

# 冰-水耦合作用下流冰对闸墩的撞击破坏力学特性响应

司才龙<sup>1</sup>, 贾治元<sup>1</sup>, 贡力<sup>2</sup>

(1. 甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 兰州 730000;

2. 兰州交通大学土木工程学院, 兰州 730070)

**摘要** 西北寒冷地区长距离输调水工程冬季输水过程中渠道及河道中修建的闸墩等水工建筑物经常受到流冰的撞击破坏影响,为保障冬季输水的稳定性及安全性,需进行冰水耦合作用下流冰对闸墩的撞击破坏力学特性响应研究。应用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件,基于任意拉格朗日-欧拉(arbitrary Lagrangian-Eulerian,ALE)流固耦合方法建立了冰-水耦合作用下流冰撞击闸墩的精细化有限元模型,并通过相关规范对流冰撞击力进行对比,验证了冰材料数值模型的准确性及有效性。以冰-水耦合模型、附加质量模型、无流体模型和流冰特性(流冰速度、流冰压缩强度)为变量,探究流冰对闸墩的力学特性响应规律。研究结果表明:流冰对闸墩的撞击破坏影响主要集中在流冰-闸墩碰撞接触区域,且水介质的黏滞作用显著降低了流冰对闸墩的损伤破坏;对于不同模型碰撞工况下流冰撞击时的闸墩力学特性,附加质量模型计算得到的撞击力和 $x$ 方向位移峰值最大,无流体模型次之,流固耦合模型最小,表明附加质量模型进行仿真计算更有利于结构设计,而流固耦合模型能更真实模拟流冰-闸墩相互作用进程。流冰撞击力峰值和均值均随着流冰速度及压缩强度的增大而增大,表明流冰速度和流冰压缩强度对撞击力的影响不容忽视。因此,在实际工程中可设置拦冰索等措施以降低流冰撞击力确保结构安全。

**关键词** 数值模拟;流固耦合;力学特性;撞击力;水介质

**中图分类号** TV672; **文献标志码** A

## Mechanical Characteristics of Impact Damage of Flowing Ice on Gate Piers under Ice-water Coupling

SI Cai-long<sup>1</sup>, JIA Zhi-yuan<sup>1</sup>, GONG Li<sup>2</sup>

(1. Gansu Water Resources and Hydropower Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China;

2. Department of Civil Engineering, Lanzhou Jiao tong University, Lanzhou 730070, China)

**[Abstract]** In the winter water transfer process of the Northwest cold region long-distance water transfer project, channels and hydraulic structures such as gate piers are frequently subjected to damage from flowing ice impacts. To safeguard the stability and security of winter water transfer operations, it is imperative to investigate the mechanical response characteristics of gate piers under the influence of flowing ice impact. ANSYS/LS-DYNA finite element software was employed to establish a refined finite element model of the gate pier under ice-water coupling conditions using the arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) fluid-solid interaction method. The accuracy and validity of the numerical model are verified by comparing the impact forces of flowing ice against relevant standards. The mechanical response characteristics of flowing ice on the gate pier by varying models such as the ice-water coupling model, additional mass model, fluid-free model, and flowing ice characteristics (velocity and compression strength) was explored. The findings indicated that the impact damage from flowing ice on the gate pier primarily occurs at the collision contact area between flowing ice and the gate pier. The presence of the water medium significantly mitigates the damage caused by flowing ice, emphasizing its viscous effects. Comparing different collision condition models, the additional mass model exhibits the highest impact force and  $X$ -direction displacement peak values, followed by the fluid-free model, with the fluid-solid coupling model showing the least impact, thereby suggesting the suitability of the additional mass model for simulation calculations and structural design. Furthermore, the result revealed that both the peak and mean impact forces increase with higher flow ice velocities and compression strengths, underscoring the importance of considering these factors in impact force assessments. Practical measures such as installing ice stopping ropes are recommended to mitigate flow ice impact forces and ensure structural safety in real-world applications.

收稿日期:2024-05-15 修订日期:2024-08-01

基金项目:国家自然科学基金(51969011);甘肃省科技计划(21JR7RA30)

第一作者:司才龙(1984—),男,汉族,甘肃兰州人,硕士,高级工程师。研究方向:水工结构安全性。E-mail:442146759@qq.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

[Keywords] numerical simulation; fluid-structure interaction; mechanical properties; impact force; water medium

冰凌问题是中国北方寒冷地区较常出现的冰情现象,流凌形成一般经过结冰期、封冻期、流冰期3个阶段<sup>[1]</sup>。在开河流冰期间,流冰在水流的拖拽下在河道中输移扩散,对河道中修建的闸墩等工程产生了撞击威胁,长期的撞击会形成损伤积累效应,降低水工建筑物的使用寿命,引发工程事故<sup>[2-3]</sup>。因此,开展流冰对闸墩等水工建筑物撞击破坏力学机理的研究迫在眉睫。

国内外学者对流凌引发的一系列问题展开了大量的研究。其研究手段主要有缩尺试验和数值模拟。其中试验研究可靠性高,但试验研究成本高,耗时长,且只能得到少量数据,因此应用范围有限。而随着计算机硬件和非线性有限元技术的迅速发展,数值仿真技术在处理船-冰、冰-结构相互问题有显著的优势<sup>[4]</sup>。在船-冰相互作用研究方面,曲悦含等<sup>[5]</sup>利用流固耦合方法实现了船体-浮冰-海水的耦合作用,分析了不同碰撞影响参数对船冰碰撞冰载荷的影响;Zhang等<sup>[6]</sup>运用CFD-DEM(computational fluid dynamics & discrete element method)组合方法研究了全尺度船-冰相互作用过程;Kim等<sup>[7]</sup>研究了破冰过程中船舶水动力对冰阻力的影响。可以看出,学者们已对船-冰相互作用开展了大量的研究。而在冰-混凝土结构相互作用研究方面,Gong等<sup>[8]</sup>开展0.3 m<sup>3</sup>小尺度流冰对输水隧洞的撞击破坏机理研究;贾治元等<sup>[9]</sup>开展了450 m<sup>3</sup>大尺度冰排对桥墩撞击挤压的数值模拟研究。但通过Deng等<sup>[10]</sup>对黄河冰的观测结果,发现河冰长宽大多都在3.8~4.5 m之间且尺寸大多呈不规则形状。综上所述,目前关于小尺度流冰和大尺度冰排对水工结构的碰撞研究较多,但关于中等尺度大小流冰对水工结构撞击影响的研究较少。

此外,闸墩等水工建筑物一般在有水环境下运行,这种运行方式使其涉及两相流运动和流体与固体的相互作用,而目前对冰-混凝土结构相互作用的研究大多都未考虑水动力效应。事实上,水的动力效应使得碰撞过程极其复杂,Liu等<sup>[11]</sup>采用数值模拟方法,对船-冰碰撞过程中水动力效应所伴随的影响进行了分析;贾子琛等<sup>[12]</sup>设计了海冰与固定圆柱体之间水动力相互作用的试验,并采用CFD-FEM方法研究了水动力作用对海冰与固定圆柱体碰撞过程的影响。上述研究均发现流体介质在船-冰碰撞过程中有着显著的影响。

鉴于此,基于非线性有限元数值模拟软件,采用任意拉格朗日-欧拉(arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)流固耦合方法对冰-水耦合作用下中等尺

度大小流冰对闸墩的力学特性展开了研究,以期为西北干旱地区闸墩等水工建筑物的防冰破冰提供理论支撑和技术参考。

## 1 理论基础

### 1.1 显示时间积分法

流冰-闸墩相互作用属于强迫振动问题。考虑沙漏阻尼后,根据达朗贝尔原理,建立流冰-闸墩撞击过程中的动力学方程为

$$M\ddot{U}(t_n) = P(t_n) - F^{im}(t_n) + H(t_n) - C\dot{U}(t_n) \quad (1)$$

式(1)中: $M$ 为质量矩阵; $\ddot{U}(t_n)$ 为 $t_n$ 时刻节点的加速度列阵; $P(t_n)$ 为外力向量列阵; $F^{im}(t_n)$ 为内力矢量; $H(t_n)$ 为沙漏阻尼向量; $C$ 为阻尼矩阵; $\dot{U}(t_n)$ 为节点速度列阵; $U(t_n)$ 为位移列阵。

### 1.2 流固耦合法

流冰与闸墩的碰撞过程中周围水的影响通过定义任意拉格朗日-欧拉(ALE)流固耦合(FSI)算法来解决。在该算法中对流体(水、空气)和固体(流冰、桥墩)的网格分别采用Euler网格和Lagrange网格,利用\*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID实现流体与固体的耦合,并且通过罚函数法在耦合界面处传递流体与固体的相互作用力。

### 1.3 附加质量法

附加质量法的原理是在建模时不考虑流体介质模型,而将水动力作用以附加质量的形式附加到流冰上。目前附加质量法在船-船、船-冰碰撞方面研究较多。本文中参考Song等<sup>[13]</sup>对冰-结构附加质量法的研究,通过增大流冰材料密度来达到附加质量的目的,附加质量系数参考郑霄阳等<sup>[14]</sup>的研究,选取流冰总质量的0.05倍进行附加质量的计算,并进行转换,公式为

$$\rho = (1 + mx)\rho_0 \quad (2)$$

式(2)中: $\rho$ 为经过附加质量后的流冰密度,kg/m<sup>3</sup>;  $m_x$ 为附加质量系数; $\rho_0$ 为初始流冰密度,kg/m<sup>3</sup>。

## 2 流冰-闸墩碰撞模型建立

### 2.1 闸墩模型

闸墩类型以频繁发生冰凌灾害的引洮供水二期工程中修建的某闸墩为例。引洮供水工程是从洮河流域调水到甘肃省中部干旱地区,用于解决该地区农业灌溉以及人畜饮水等用水问题的重大水利工程。该工程主要包括闸墩、暗渠、陡坡、倒虹吸等水工建筑

物,其中总干渠长 95.091 km,总干渠设计引水流量  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ,加大引水流量为  $22.5 \text{ m}^3/\text{s}$  [15]。

在数值分析中,选取单个墩体进行有限元求解计算。在流冰-闸墩撞击过程中,闸墩混凝土表面会发生损伤变形。因此对于闸墩材料的选择应具有塑性变形,混凝土材料模型选用连续面盖帽材料模型 Mat CSCM (continuous surface cap model) [16],模型参数如表 1 所示。对闸墩前端网格加密划分,网格尺寸设置为 0.1 m。

表 1 混凝土材料模型参数

参数	数值
质量密度 $r_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 500
计算控制参数	0
计算控制参数	0
率效应开关	1
预损伤	0
侵蚀系数	1.1
系数恢复参数	10
盖帽选项	0
抗压强度/MPa	29
骨料粒径/m	0.02
单位制	4

## 2.2 流冰模型

流冰模型根据 Deng 等 [10] 对黄河冰的观测结果。有限元计算中将各种不规则的河冰简化为正方体,流冰尺寸选取为  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ ,冰体单元网格设置为 0.1 m,冰材料模型采用各向同性弹性失效模型 (\* MAT\_ISOTROPIC\_ELASTIC\_FAILED) [17],冰材料模型参数如表 2 所示。同时,由于流冰撞击闸墩结构具有随机性,故对流冰的自由度不进行约束。根据于天来等 [18] 对河冰应变率的研究,天然河道冰的脆脆破坏分界点的应变率在  $4.76 \times 10^{-5} \sim 9.52 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  之间,故采用应变率作为冰的失效准则。

表 2 冰材料参数

参数	数值
材料密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	910
剪切模量/ GPa	2.2
屈服应力/ MPa	2.1
塑性模量/ GPa	4.26
体积模量/ GPa	5.26
塑性失效应变	$7.81 \times 10^{-4}$
截断应力/ MPa	-4

## 2.3 流体模型

为准确模拟流体作用下流冰对闸墩的碰撞作用,使流场尽可能地贴近真实情况,选取  $12.8 \text{ m} \times$

$10 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$  和  $12.8 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  的长方体水域和空气域,网格尺寸均设置为  $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ ,采用本构模型 Null 和状态方程 Polynomial 来描述流体样变形特性 [19],两者参数设置如表 3 所示。

表 3 水介质与空气介质材料模型参数

Table 3 Material model parameters for water and air media

参数	空气介质	水介质
密度	1.184 5	998.21
截断压力	-10	$-1 \times 10^5$
黏度系数	$1.745 6 \times 10^{-5}$	$8.684 \times 10^{-4}$
常数 $C$		1 647
常数 $S_1$		1.921
常数 $S_2$		-0.096
系数 $C_4$	0.4	
系数 $C_5$	0.4	
常数		0.35
初始内能 $E_0/\text{J}$	$2.53 \times 10^5$	$2.895 \times 10^5$
初始相对体积 $V_0$	1.0	1.0

流冰-闸墩碰撞过程中,在重力作用下流冰会出现沉降现象,为避免出现上述现象,本文所采用的方法是利用 \* INITIAL\_HYDROSTATIC\_ALE、\* CONTROL\_ALE 关键字协同施加静水压力对流冰产生浮力,并通过设置质量阻尼 (\* DAMPING\_PART\_MASS)减小压力波形震荡,以此使流冰处于竖向平衡状态。从图 1 中可以清楚地看到压力初始化完成后分层明显,是由于计算开始后水体在重力作用下迅速向下进行水压初始化达到正常水压数值,进而导致水压初始化完成后分层明显。从图 2 中可以看到,同一深度下压力值基本保持稳定,在 0、1.5、2.5、3.5 m 水深处通过数值模拟计算所得静水压力值分别为  $1.02 \times 10^5$ 、 $1.13 \times 10^5$ 、 $1.21 \times 10^5$ 、 $1.30 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,而通过静水压力公式推算得到的静水压力值分别为  $1.01 \times 10^5$ 、 $1.16 \times 10^5$ 、 $1.25 \times 10^5$ 、 $1.35 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,其平均误差为 4.39%。上述结果表明本文所使用的流体模型能够较为准确的模拟流冰-闸墩相互作用过程。

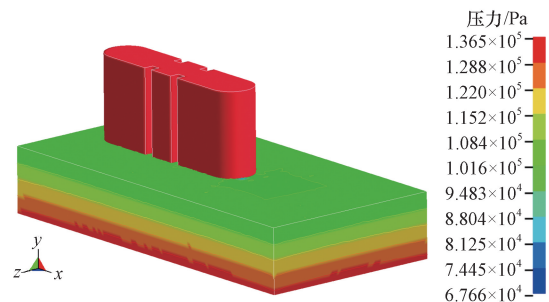


图 1 流场压力云图

Fig. 1 Pressure cloud map of flow field

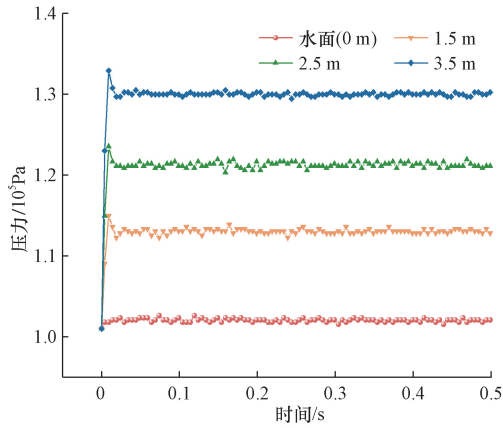


图2 不同水深下流场压力时程曲线

Fig. 2 Pressure time history curve of flow field under different water depth

## 2.4 流冰-闸墩流固耦合模型建立

水介质中流冰对闸墩的撞击是一个非线性动力响应过程,该文运用非线性有限元数值模拟软件 ANSYS/LS-DYNA 建立数值仿真模型,如图 3 所示。首先采用 ANSYS/HYPERMESH 软件建立三维模型并进行网格划分;其次利用 LS-PREPOST 软件进行关键字的修改,将流冰-闸墩接触算法设置为对称罚函数法,接触类型分别设置为自动面面接触 (automatic surface-to-surface contact, ASTS) 和侵蚀单面接触 (eroding single-sided contact, ESS),分别用以检测流冰-闸墩之间的接触和流冰与流冰单元之间的接触,为避免碰撞接触时发生初始穿透,设置流冰-闸墩法向距离为 0.005 m。此外,在流固耦合模型中还需定义欧拉单元的边界条件和初始条件,对水域、空气域设置无反射边界条件,模拟无限的流域来忽略反射波的影响。为了使流冰在流体介质中的运动不受影响,将水域沿  $y$  正方向的自由度进行约束,其余部分定义为流体自由出入边界,并对闸墩底部  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向的自由度进行约束。考虑到实际工程中流冰对闸墩的碰撞影响主要为  $x$  方向,且风速影响较小。因此,本次模拟忽略风速影响,选

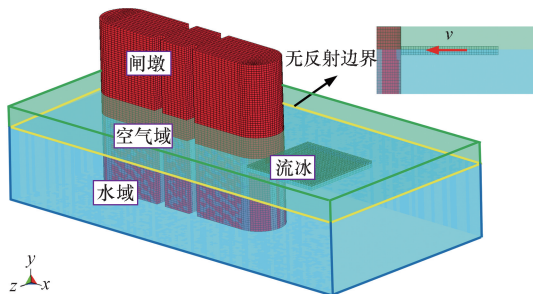


图3 水介质中流冰-闸墩碰撞模型

Fig. 3 Collision model of drift ice and gate pier in water medium

用冰初速度为  $x$  负方向,为冰提供动力,设置完成后利用动力学分析命令输出 K 文件;最后采用 LS-DYNA 显示动力学求解软件进行求解计算。

此外,为验证所建模型的准确性,本文中计算了流冰速度为 1.5 m/s,流冰压缩强度为 2.136 MPa 碰撞工况下流冰-闸墩撞击力,撞击力时程曲线见图 4。根据《水工建筑物抗冰冻设计规范》<sup>[20]</sup> 中流冰撞击力计算公式计算所得撞击力为 441 kN。这与有限元计算结果的峰值 425.5 kN 误差仅为 3.51%,表明本文所建立的模型能较为准确地模拟流冰-闸墩相互作用过程。

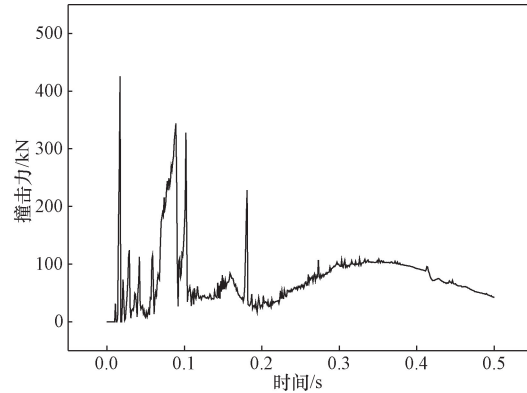


图4 撞击力时程曲线

Fig. 4 Impact force time history curve

## 3 数值模拟结果与分析

### 3.1 水介质中流冰-闸墩相互作用分析

本文中首先对流冰速度为 1.5 m/s,流冰压缩强度为 2.136 MPa 碰撞工况下流冰-闸墩相互作用进行研究。

#### 3.1.1 不同模型下流冰-闸墩相互作用分析

为明晰水介质对流冰-闸墩碰撞过程的影响,分别建立了附加质量模型、流固耦合模型、无流体模型。图 5、图 6 分别给出了不同模型下的撞击力时程曲线和不同模型下的  $x$  方向位移时程曲线。

从图 5 中可以看出,3 种模型下的撞击力时程曲线均呈现出十分复杂的强非线性特征,出现多个波峰和波谷,有效地体现了冰体出现失效的非线性特征。从图 5 中还可以看出,不同模型下的撞击力峰值出现时间具有显著差别,附加质量模型和无流体模型下的峰值出现时间均为 0.010 s,而流固耦合模型下的峰值出现时间为 0.017 s,出现上述现象的原因是流冰与闸墩结构接触碰撞之前,流冰需要克服“水垫效应”做功,致使碰撞时刻出现滞后现象。由表 4 可以看出,无流体模型和流固耦合模型计算得到的撞击力峰值和均值计算结果较为接近,差别

不超过 5%,而附加质量模型计算得出的撞击力峰值和均值较大。上述结果表明通过附加质量法计算得到的结果偏大,更有利于结构设计,而流固耦合模型由于将动水作用考虑在内,能更真实地模拟流冰-闸墩相互作用过程。

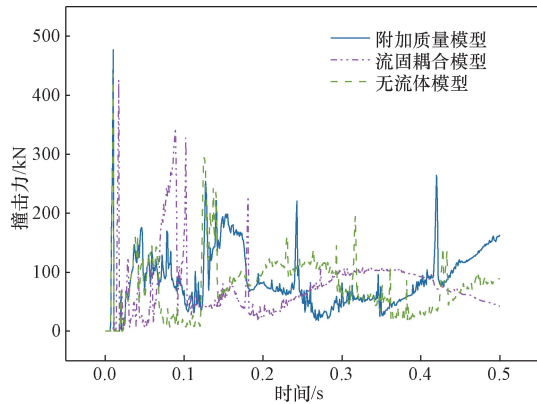


图 5 不同模型下撞击力时程曲线  
Fig. 5 Impact force time-history curves under different models

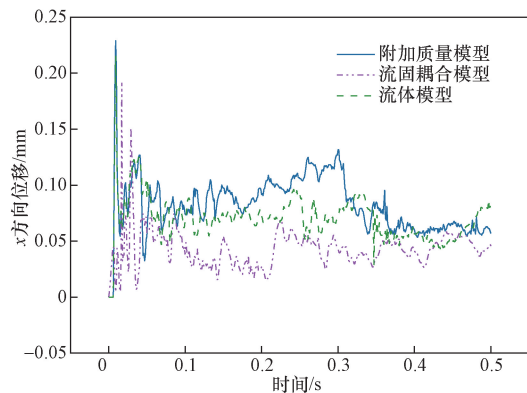


图 6 不同模型下 x 方向位移时程曲线  
Fig. 6 Displacement time history curve in x direction under different models

表 4 不同模型下流冰-闸墩撞击力及位移统计  
Table 4 Statistics of ice-gate pier impact force and displacement under different models

模型	撞击力峰值/kN	撞击力均值/kN	x 方向位移峰值/mm
附加质量模型	476.9	87.7	0.23
流固耦合模型	425.5	75.3	0.19
无流体模型	436.3	76.1	0.22

由图 6 可知,3 种模型下的 x 方向位移时程曲线轨迹基本相似,均呈现出 3 个阶段:第一阶段流冰持续挤压碰撞,x 方向位移时程曲线进入加载阶段;第二阶段由于建模时流冰较小和水介质的阻尼作用,流冰表现出轻微的反弹,x 方向位移时程曲线呈现出卸载特征;第三阶段为 0.047 s 后,闸墩接触区混凝土 x 方向位移稳定在 0.05 mm 左右,表明此时闸墩接触区混凝土发生塑性变形。但由表 4 可知,附加质量模型计算得到的 x 方向位移峰值较大,无流体模型次之,流固耦合模型最小,表明水介质的黏滞作用有效降低了流冰对闸墩结构的损伤。

图 7 进一步给出了 3 种模型下的闸墩结构 x 方向位移云图。从图 7 中可以看出,闸墩结构接触碰撞区 x 方向位移云图存在着高损伤区域,且随着时间的前进位置不断发生改变,产生这一现象的原因是流冰-闸墩碰撞过程中冰单元不断超越弹性阶段,发生失效破坏。同时以上结果也表明,流冰对闸墩结构的损伤主要集中流冰-闸墩碰撞接触区域,因此在实际工程中应设置合理的防撞装置防治流冰对闸墩等水工建筑物长时间的撞击破坏。

### 3.1.2 水介质中流冰-闸墩碰撞损伤分析

为准确模拟水介质中流冰-闸墩碰撞过程,图 8 给出了流固耦合模型下的流冰-闸墩三维碰撞图。从图 8 中可以看出,在 0.005 96 s 时等效应力峰值为

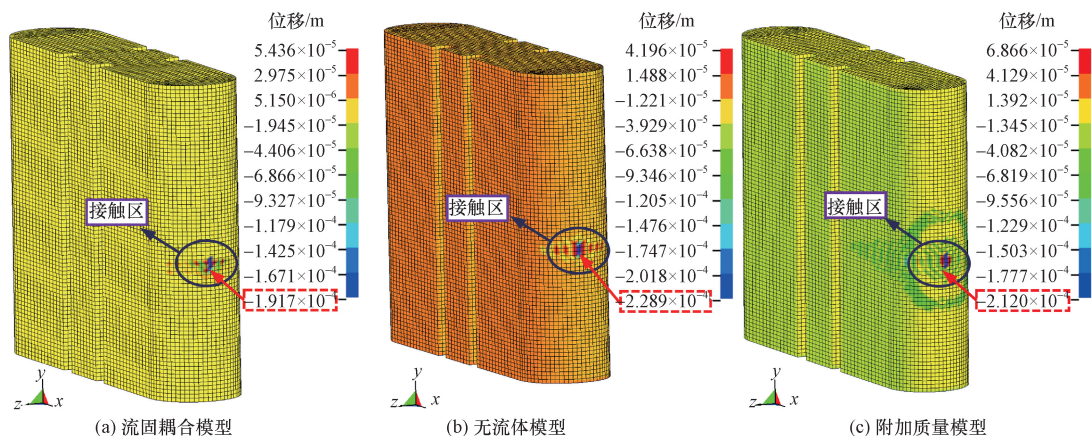


图 7 不同模型下 x 方向位移云图  
Fig. 7 Displacement cloud images in x direction under different models

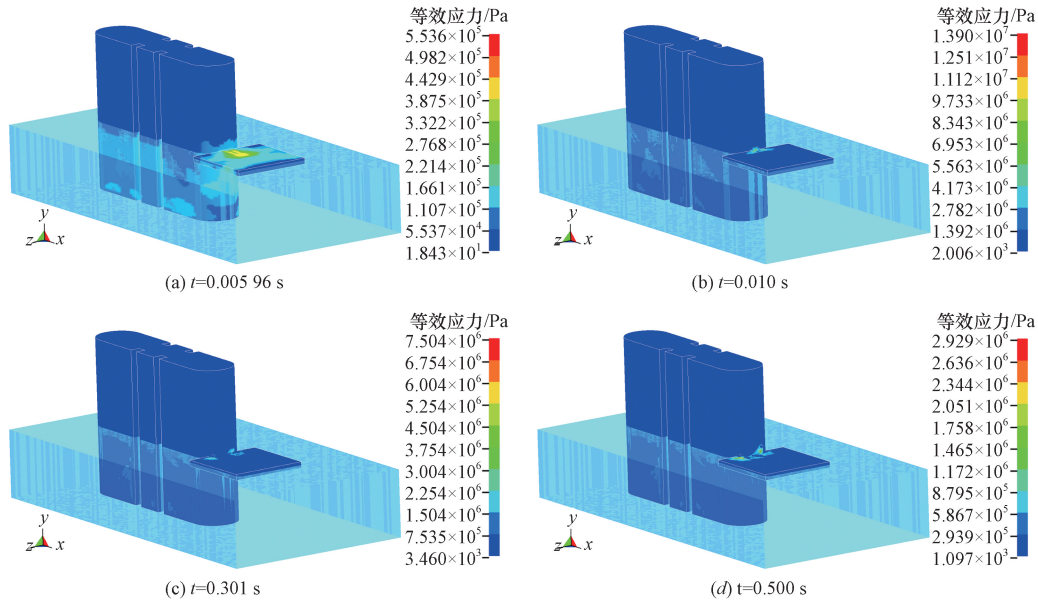


图8 不同时刻下流冰-闸墩三维碰撞模型图

Fig. 8 Three-dimensional collision model of flow ice-gate pier at different times

$5.636 \times 10^5$  Pa, 此时流冰-闸墩还未发生接触, 出现应力的原因是流冰近场逼近闸墩过程中, 水介质会因受到挤压而预先产生高压力场, 该压力场会对闸墩结构产生瞬态高压力载荷。在 0.010 s 时流冰-闸墩发生接触碰撞, 此时等效应力峰值达到了  $1.390 \times 10^7$  Pa, 其后在 0.301、0.500 s, 等效应力峰值分别为  $7.504 \times 10^6$ 、 $2.296 \times 10^6$  Pa, 呈现近似下降趋势, 这是因为随着流冰持续碰撞挤压, 流冰内部已发生损伤破坏, 致使应力峰值不断下降。从图 8 中还可以看出, 流冰对闸墩的撞击损伤主要集中在接触区, 远离接触区的影响较小, 这和 3.1.1 节  $x$  方向位移云图分析基本一致。

### 3.2 不同流冰速度下流冰-闸墩力学特性分析

为研究水介质中不同流冰速度对闸墩的力学特性。取流冰压缩强度为 2.136 MPa, 结合西北干寒地区冬季河流流速, 选取 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m/s 5 种速度工况进行流冰与闸墩的碰撞模拟分析。

图 9 给出了不同流冰速度  $V$  下的撞击力时程曲线。可以发现, 不同撞击力  $F$  时程曲线的相同之处在于均呈现出很强的随机波动现象; 不同之处在于撞击力峰值出现时间存在显著的差异, 随着流冰速度的增大峰值出现时间不断提前。进一步对图 9 曲线峰值和均值进行了统计并曲线拟合, 由图 10 可知, 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m/s 5 种工况下撞击力峰值分别为 381.3、401.8、425.5、459.0、489.0 kN, 撞击力均值分别为 54.7、68.8、75.2、91.3、100.8 kN, 随着流冰速度的增加而增大, 即流冰速度越快撞击力越大, 这

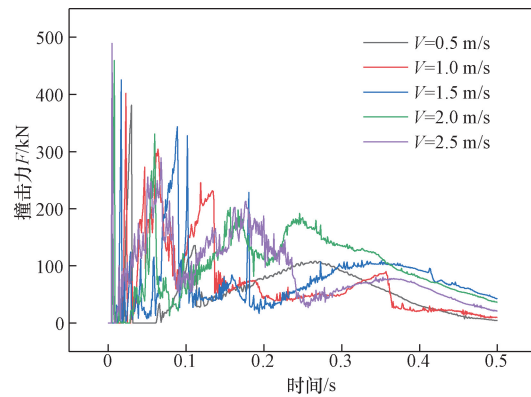


图9 不同速度下撞击力时程曲线

Fig. 9 Impact force time-history curves at different speeds

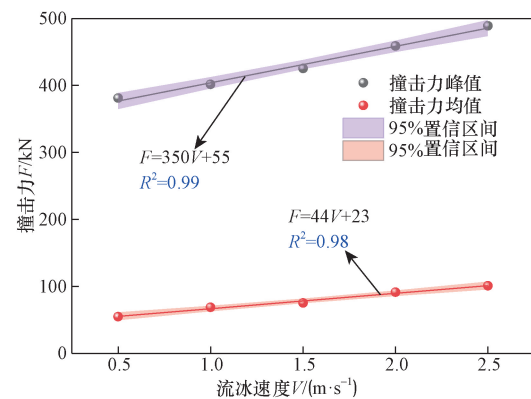


图10 不同速度与撞击力关系曲线

Fig. 10 Curve of different velocities versus impact force

是由于流冰速度的增加会导致流冰与闸墩碰撞时动量增加, 致使撞击力呈现出近似于  $F = aV + b$  的线性函数关系。因此, 在实际工程中, 应采用拦冰索等措

施降低流冰速度以确保闸墩结构安全。

### 3.3 不同流冰压缩强度下流冰-闸墩力学特性分析

为研究水介质中不同温度流冰对闸墩的力学特性,取流冰速度为 1.5 m/s,流冰压缩强度  $f$  根据当地水文站实测降水和蒸发资料推得冬季平均气温在  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,最低气温为  $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,参考王庆凯等<sup>[21]</sup>对流冰压缩强度与温度研究得到的关系  $f_f = 0.767 \times \ln|T| + 0.591$ ,设置温度  $T$  为  $-7.5$ 、 $-12.5$ 、 $-17.5$ 、 $-22.5$ 、 $-27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  等 5 种温度工况,即对应流冰压缩强度  $f$  分别为 2.136、2.528、2.789、2.979、3.133 MPa 进行流冰与闸墩碰撞仿真模拟分析。

图 11 给出了不同流冰压缩强度工况下的撞击力时程曲线。可以发现,不同撞击力时程曲线的均呈现出强非线性特征。进一步对图 11 曲线峰值和均值进行了统计并曲线拟合,由图 12 可知,2.136、2.528、2.789、2.979、3.133 MPa 五种压缩强度工况下撞击力峰值分别为 425.5、470.8、536.2、627.1、718.6 kN,撞击力均值分别为 75.2、78.1、75.2、88.4、127.8 kN,随着流冰压缩强度的增加而增大,

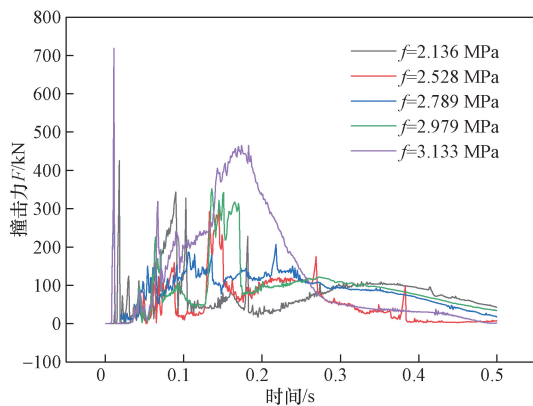


图 11 不同压缩强度下撞击力时程曲线

Fig. 11 Impact force time-history curves at different compressive strengths

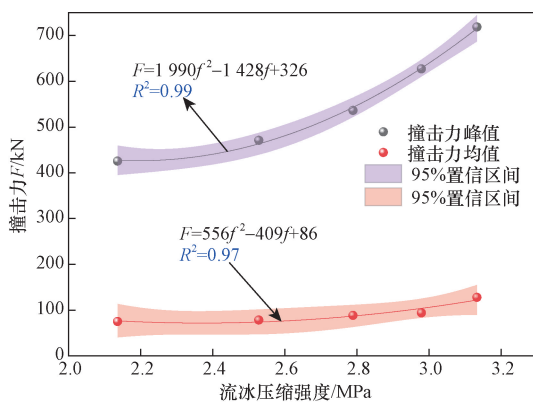


图 12 不同压缩强度与撞击力关系曲线

Fig. 12 Curve of different compression strength versus impact force

即流冰压缩强度越大撞击力越大。同时发现当流冰压缩强度在 2.136 ~ 2.789 MPa 区间时,撞击力增长幅度较小;当流冰压缩强度大于 2.789 MPa 时,撞击力增长较为明显,表明环境温度的变化对流冰撞击力的影响不容忽视,其关系拟合曲线为  $F = af^2 + bf + c$ 。因此,在实际工程中,应及时关注冬季气温变化以掌握流冰压缩强度改变引起的撞击力变化,采取针对性的防冰措施保证结构安全。

## 4 结论

本文采用非线性有限元数值模拟软件,基于任意拉格朗日-欧拉(ALE)流固耦合方法建立了冰-水耦合作用下流冰撞击闸墩的精细化有限元模型,对流冰与闸墩的撞击过程进行了数值模拟。结果表明,所采用的方法较好地模拟了流冰与桥墩的相互作用过程,通过规范验证、冰-水耦合作用下流冰-闸墩相互作用分析、不同流冰特性(流冰速度、流冰压缩强度)流冰-闸墩相互作用分析,得到了以下结论。

(1) 在不同模型碰撞工况下。附加质量模型计算得到的撞击力和  $x$  方向位移峰值最大,无流体模型次之,流固耦合模型最小,表明附加质量模型进行仿真计算更有利于结构设计,而流固耦合模型由于将碰撞过程中的水介质考虑在内,能够更真实的模拟流冰-闸墩相互作用过程。同时还发现流冰对闸墩结构的损伤主要集中在流冰-闸墩碰撞接触区域,且水介质的存在有效降低了流冰对闸墩结构的损伤。

(2) 在保持流冰压缩强度不变的情况下,只改变流冰速度,流冰速度与撞击力峰值和均值均呈现近似线性函数的关系,主要原因是流冰与闸墩碰撞时动量增加所导致的。此外,不同流冰速度相邻撞击力峰值差值分别为 20.5、23.7、33.5、30 kN,不同流冰速度相邻撞击力均值差值分别为 14.1、6.4、16.1、9.5 kN,幅值变化明显。因此,在实际工程中,应采用拦冰索等措施降低流冰动量以确保结构安全。

(3) 在保持流冰速度不变的情况下,只改变流冰压缩强度,流冰压缩强度与撞击力峰值和均值均呈现近似多项式函数的关系,且同时发现当流冰压缩强度在 2.136 ~ 2.789 MPa 区间时,撞击力增长幅度较小;当流冰压缩强度大于 2.789 MPa 时,撞击力增长较为明显。在实际工程中环境温度越低,流冰压缩强度越大,因此应及时关注冬季气温变化以掌握流冰压缩强度改变引起的撞击力变化,采取针对性的防冰措施在输水过程中降低流冰对闸墩结构的碰撞破坏作用。

## 参 考 文 献

- [1] 胡一栋, 郭卫宁, 张毅, 等. 黄河宁夏蒙河段 2011—2020 年凌情演变规律分析[J]. 人民黄河, 2023, 45(7): 52-57.  
Hu Yidong, Guo Weining, Zhang Yi, et al. Analysis of the evolution of ice regime in Ningxia-Inner Mongolia Reach of Yellow River from 2011 to 2020[J]. Yellow River, 2023, 45(7): 52-57.
- [2] 杨启贵, 张传健, 颜天佑, 等. 长距离调水工程建设与安全运行集成研究及应用[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(7): 1188-1210.  
Yang Qigui, Zhang Chuanjian, Yan Tianyou, et al. Integrated research and application of construction and safe operation of long-distance water transfer projects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(7): 1188-1210.
- [3] 贾治元, 贡力, 党丹丹, 等. 冰-水耦合作用下流冰对明渠的撞击破坏响应分析[J]. 振动工程学报, 2023, 36(4): 1033-1043.  
Jia Zhiyuan, Gong Li, Dang Dandan, et al. Analysis of the impact damage response of open channels by drift ice under coupled ice-water action[J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(4): 1033-1043.
- [4] 王胜永, 岳前进, 毕祥军, 等. 渤海海洋平台不规则锥体抗冰振性能[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(32): 6-10.  
Wang Shengyong, Yue Qianjin, Bi Xiangjun, et al. Ice-induced vibration reduction effectiveness of platform with irregular cone in Bohai Bay[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(32): 6-10.
- [5] 曲悦含, 冯国庆, 徐莹, 等. 大块浮冰与船体碰撞的冰载荷研究[J]. 船舶工程, 2023, 45(4): 79-87.  
Qu Yuehan, Feng Guoqing, Xu Ying, et al. Research on ice load caused by collision between large floating ice and ship[J]. Ship Engineering, 2023, 45(4): 79-87.
- [6] Zhang J N, Zhang Y, Shang Y C, et al. CFD-DEM based full-scale ship-ice interaction research under FSICR ice condition in restricted brash ice channel[J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 194: 103454.
- [7] Kim J, Yoon H D, Choung J. Numerical study of ship hydrodynamics on ice resistance during ice sheet breaking[J]. Ocean Engineering, 2024, 308: 118285.
- [8] Gong L, Dong Z Q, Jin C L, et al. Flow-solid coupling analysis of ice-concrete collision nonlinear problems in the Yellow River Basin[J]. Water, 2023, 15(4): 643.
- [9] 贾治元. 水介质中流冰对桥墩的撞击破坏机理研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.  
Jia Zhiyuan. Study on the impact damage mechanism of bridge piers by drift ice in aqueous medium[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [10] Deng Y, Li C J, Li Z J, et al. Dynamic and full-time acquisition technology and method of ice data of Yellow River[J]. Sensors, 2021, 22(1): 176.
- [11] Liu R W, Xue Y Z, Lu X K. Coupling of finite element method and peri dynamics to simulate ship-ice interaction[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(3): 481.
- [12] 贾子琛, 孙哲, 赵禹, 等. 水动力对海冰-结构物相互作用影响的研究[J]. 中国造船, 2024, 65(1): 190-201.  
Jia Zichen, Sun Zhe, Zhao Yu, et al. Research on hydrodynamic force influence on ice-structure interaction[J]. Shipbuilding of China, 2024, 65(1): 190-201.
- [13] Song M, Kim E, Amdahl J, et al. A comparative analysis of the fluid-structure interaction method and the constant added mass method for ice-structure collisions[J]. Marine Structures, 2016, 49: 58-75.
- [14] 郑霄阳, 范存斌, 王英森, 等. 三峡库区弯曲河段大偏角船桥碰撞力分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(7): 2937-2946.  
Zheng Xiaoyang, Fan Cunbin, Wang Yingsen, et al. Collision force analysis of ship-bridge with large deflection angle in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(7): 2937-2946.
- [15] 张娇艳. 冰-水耦合作用下平整冰与竖向柱体碰撞研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.  
Zhang Jiaoyan. Study on the collision between flat ice and vertical cylinders under ice-water coupled action[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [16] 贡力, 杨腾腾, 靳春玲, 等. 水-空气耦合介质中冰载荷对闸墩的撞击影响研究[J]. 工程力学, 2024, 41(6): 177-187.  
Gong Li, Yang Tengting, Jin Chunling, et al. Research on collision of ice loads on the sluice pier in water-air coupling medium[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(6): 177-187.
- [17] 贡力, 董洲全, 杨腾腾, 等. 水介质中冰-桥墩碰撞动力响应分析[J]. 振动与冲击, 2024, 43(11): 72-82.  
Gong Li, Dong Zhouquan, Yang Tengting, et al. Analysis of the dynamic response of ice-bridge pier collisions in water media[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(11): 72-82.
- [18] 于天来, 雷俊卿, 单思镝, 等. 春季河冰流凌对桥墩撞击作用计算模型的研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(6): 192-195, 201.  
Yu Tianlai, Lei Junqing, Shan Sidi, et al. Calculation model of impact effect of river ice on piers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(6): 192-195, 201.
- [19] 张伟. 船舶与层冰碰撞的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.  
Zhang Wei. Numerical simulation of collision between ship and ice[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [20] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物抗冰冻设计规范: SL 211—2006[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for anti-freezing design of hydraulic structures: SL 211—2006[S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2006.
- [21] 王庆凯, 张宝森, 邓宇, 等. 黄河冰单轴压缩强度的试验与影响因素探究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(9): 90-94.  
Wang Qingkai, Zhang Baosen, Deng Yu, et al. Study on test of uniaxial compressive strength of ice in Yellow River and its influencing factors[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(9): 90-94.