



三峡升船机下闸首工作门止水性能优化

游强, 闫晓青, 李明, 邹斌斌

(长江三峡通航管理局, 湖北宜昌 443000)

摘要: 针对三峡升船机下闸首工作门充压止水破损漏气导致封水效果不佳的问题, 采用有限元分析软件 ABAQUS 建立充压止水有限元模型, 分析在增加充压止水翼头高度时不同止水橡胶材料对充压止水封头自由外伸量、背腔密闭性、封头水密性、封头偏移量、止水摩阻力的影响。结果表明, 充压止水封头的接触应力、正应力和最大偏移量均随着橡胶材料的硬度降低而减小; 挡水水头越低, 材料硬度的敏感程度越高; 接触应力和正压力均随着翼头高度的增加而增大。最后提出通过优化充压止水橡胶材料的方法来改善充压止水封水效果和服役寿命。

关键词: 三峡升船机; 下闸首工作门; 充压止水; 橡胶材料; 性能优化

中图分类号: U642.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0165-07

Sealing performance optimization of lower head work gate for Three Gorges ship lift

YOU Qiang, YAN Xiaoqing, LI Ming, ZOU Binbin

(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443000, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor sealing effect caused by the damage and leakage of the pressurized water seal of the lower head work gate for Three Gorges ship lift, this paper establishes the model of pressurized water seal using the finite element analysis software ABAQUS, and analyzes the influence of different sealing rubber materials on the free extension of seal head, tightness of back cavity, water tightness of seal head, head offset and friction resistance of seal head when the height of seal head is increased. The results show that the contact stress, normal stress and maximum offset of the pressurized water seal head all decrease with the decrease of the hardness of the rubber material. The lower the water head, the higher the sensitivity of the material hardness. Both the contact stress and normal pressure increase with the increase of the height of the wing head. Finally, the method of optimizing the pressurized seal rubber material is proposed to improve the effect and service life of pressurized water seal.

Keywords: Three Gorges ship lift; lower head work gate; pressurized water seal; rubber material; performance optimization

升船机闸首工作门主要用作拦挡上下游引航道水体, 使升船机承船厢室段形成内部无水的运行环境, 闸首工作门的封水效果和使用寿命直接关系到升船机的安全稳定运行。三峡升船机下闸首工作门为下沉式平板门, 外形尺寸 28.84 m × 19.75 m × 4.70 m (高 × 长 × 宽), 质量约 670 t, 迎水面布置有内外侧 2 道 U 形充压止水, 由充压止水结构、动力源设备及控制设备等组成。充压止水

由山形止水橡胶、压板、座板和紧固件等组成密闭结构。下闸首工作门正常挡水时, 内外侧两道充压止水结构同时保压工作; 调整门位时, 外侧充压止水泄压退出工作; 门位调整结束后, 外侧充压止水重新充压投入工作。当压力下降到设定值时, 动力源启动向充压止水结构补压至设定压力。

三峡升船机下闸首工作门充压止水存在如下问题: 1) 工作门挡水时, 充压止水工作正常; 向

收稿日期: 2023-11-02

作者简介: 游强 (1989—), 男, 工程师, 从事升船机运维技术研究及管理。

上提升工作门时，内侧充压止水压力快速下降，充压止水拐角上部和底止水出现喷射漏水；门体调整到位后，压力缓慢回升，漏水明显减少；2) 向下调整工作门时，内侧充压止水压力逐渐升高，无明显漏水现象^[14]。分析原因可能是：1) 下闸首工作门跨度大、长期受压导致门体变形，充压止水封头与止水座板局部接触宽度不足；2) 调整门位时内侧充压止水反复摩擦运行，造成止水撕裂漏气。

本文采用有限元分析软件 ABAQUS 建立充压止水有限元模型，计算分析不同橡胶材料和翼头高度对充压止水封水性能的影响，以期对三峡升船机下闸首工作门充压止水结构优化和水工金属结构止水设计提供理论方法。

1 计算方法

1.1 计算参数拟合

止水橡胶材料具有超弹性、体积不可压缩性和大变形等特性，在止水元件的有限元分析中，橡胶的材料非线性可以用超弹性本构模型描述：

$$\sigma^e = -p^e I + 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + I_1 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) B - \frac{\partial W}{\partial I_3} B^2 \right] \quad (1)$$

式中： σ^e 为 Cauchy 应力张量； p^e 为静水压力；

I 为单位矩阵； B 为左 Cauchy-Green 变形张量，其 3 个应变不变量为： $I_1 = \text{tr}B$ ， $I_2 = (I_1^2 - \text{tr}B^2)/2$ ， $I_3 = \det B$ ，同时也可表示为主伸长率 $\lambda_i (i=1,2,3)$ 的张量形式： $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$ ， $I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2$ ， $I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2$ 。

由于水封橡胶材料为体积不可压缩材料，即其泊松比 μ 等于 0.5 或接近 0.5，故 $I_3 = 1$ ， $W = W(I_1, I_2)$ 为应变能函数，目前在工程中应用最为广泛的主要是 Rivlin 应变能函数表达式：

$$W = W(I_1, I_2) = \sum_{ij} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (2)$$

式中： C_{ij} 为超弹性参数值。

为较好地反映止水橡胶材料性能，提高计算精度，采用二阶五项模型拟合止水橡胶材料的计算参数：

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{02}(I_2 - 3)^2 \quad (3)$$

根据最小二乘法原理，采用二阶五项模型对 3 种止水橡胶材料的单轴拉伸、单轴压缩和纯剪试验数据进行曲线拟合^[5]。充压止水外有增强四氟涂层的橡胶面与钢板接触的摩擦系数取 0.2，其他部位橡胶面与钢板接触的摩擦系数取 0.5，得到的拟合系数如表 1 所示。

表 1 3 种止水橡胶材料计算参数拟合

材料	拟合参数					对钢摩擦系数 f	泊松比
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}		
SF6474	0.159 6	0.263 8	0.025 4	-0.012 2	-0.003 5	0.5/0.2	0.499 67
SF6674	0.531 4	-0.004 5	0.044 0	-0.032 4	0.014 7	0.5/0.2	0.499 67
SD007	0.243 4	0.166 5	0.025 5	-0.031 9	-0.006 7	0.5/0.2	0.499 67

1.2 非线性有限元计算

根据原下闸首工作门充压止水的实际运行效果，将充压止水翼头高度增加 5 mm，并对优化后的止水橡胶材料进行仿真分析，通过对止水背腔密闭性、封头自由外伸量、封头水密性、封头偏移量和正压力等指标的综合比较，得到止水性能更优的充压止水形式，目前下闸首工作门充压止水橡胶封头材料为 SF6674，肢体和翼头材料为 SD007，充压水封装置结构如图 1 所示。

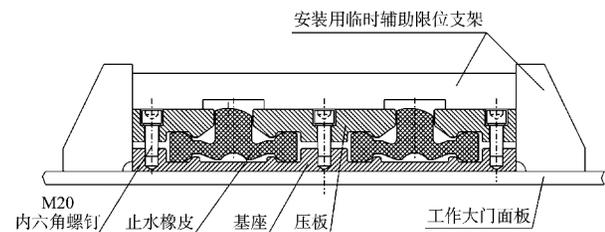


图 1 下闸首工作门充压止水结构

采用有限元分析软件对不同橡胶材料的充压止水分别进行仿真计算。由于橡胶止水元件的轴向尺寸远大于横向尺寸，且水压力作用方向平行

于横截面方向,因此整个止水元件的有限元计算分析可近似按平面应变问题处理。止水橡胶采用八结点平面应变杂交单元(非线性超弹性单元与黏弹性单元);压板、座板和止水面板采用八结点平面应变弹性单元,3种类型单元的每个结点有 x 、 y 两个方向的自由度。装配时,止水橡胶肢体与压板有接触,止水橡胶翼头与压板、座板均有接触;受背水压力 $P_{背}$ 作用后,止水橡皮封头与止水面板有接触;受库水压力 $P_{库}$ 作用后,止水橡胶与外压板有接触。共设置5组接触对,有限元模型如图2所示。

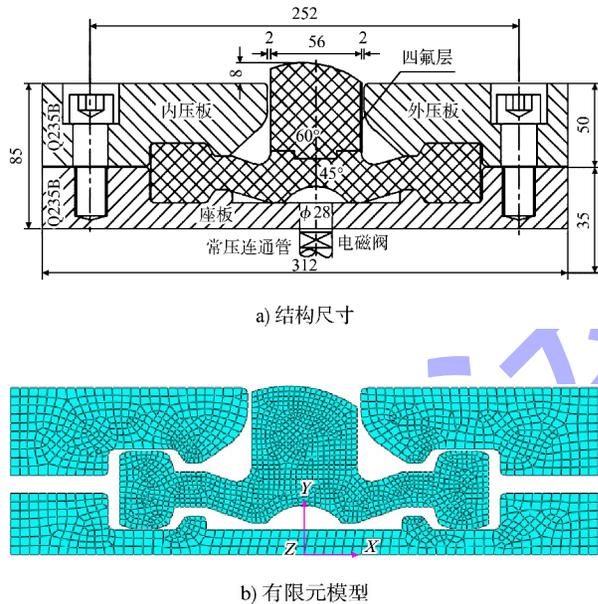


图2 充压止水有限元计算模型(单位: mm)

下闸首工作门在未承受水压力的初始状态,充压止水安装完成后,压板与止水面板的距离为5 mm;工作门承受水压力后,底主梁跨中的最大挠度约为14 mm,即工作门工作阶段压板与止水面板的最大间隙约为20 mm。下闸首工作门最大的挡水水头约为18 m。计算充压止水水密性时,采用最不利组合进行计算分析,即安装后压板与止水面板间隙取20 mm,作用在封头上的库水压力取20 m,背水压力取0.3 MPa。

止水面板和座板沿水流 x 和 y 方向有位移约束,压板在 x 方向有位移约束,在 y 方向施加位移荷载。充压止水有限元计算分两阶段考虑:一为安装阶段,对压板施加位移荷载,向下移动至与座板接触;该阶段压板与座板共同作用,压缩并夹紧止水橡胶的2个翼头;二为工作阶段,对止水橡胶施加水荷载,将背水压力和库水压力以均布线荷载方式施加在对应止水橡胶边缘上,荷载按增量法逐步增加。背水压力施加在止水元件的下边缘上,库水压力施加在止水元件封头的上游侧边缘上。依照第一步安装计算结果,分析水封接触状态,确定翼头附近荷载的施加部位。根据有限元荷载施加理论,所有荷载最终转化为结点荷载,但如果网格划分较细时,可将之视为线压力,直接施加均布荷载。

2 计算结果与分析

2.1 封头自由外伸量

为了研究不同止水橡胶材料对封水性能的影响,分别对原充压止水材料(材料1),封头、肢体和翼头材料均采用SF6674(材料2),封头、肢体和翼头材料均采用SD007(材料3)进行非线性有限元仿真计算分析^[6-7]。

为得到止水橡胶封头在背水压力作用下向闸门止水面板膨胀的力学过程,方便充压止水工作阶段加载,对止水橡胶封头的自由外伸量(水封封头与安装后压板顶面的距离)进行计算,分为安装和背水压力0~0.30 MPa作用2个阶段。3种不同止水橡胶材料封头外伸量与背水压力的关系见表2,部分计算结果如图3所示。由表2、图3可知,当背水压力达到0.06 MPa时,3种充压止水橡胶材料封头自由外伸量均超过20 mm,大于安装后压板与闸门止水面板间的最大间隙。因此,在充压止水工作阶段,可考虑背水压力达到0.06 MPa时,在充压止水封头上游侧施加库水压力。

表 2 充压止水橡胶封头外伸量与背水压力的关系

橡胶材料	封头外伸量/mm							
	$P_{背}=0$ MPa	$P_{背}=0.04$ MPa	$P_{背}=0.08$ MPa	$P_{背}=0.12$ MPa	$P_{背}=0.16$ MPa	$P_{背}=0.20$ MPa	$P_{背}=0.28$ MPa	$P_{背}=0.30$ MPa
材料 1	6.45	18.22	26.50	31.46	33.22	34.33	35.28	36.65
材料 2	6.45	16.91	24.26	29.22	32.03	33.05	34.63	34.99
材料 3	6.45	19.31	27.68	32.61	34.34	35.42	37.27	37.71

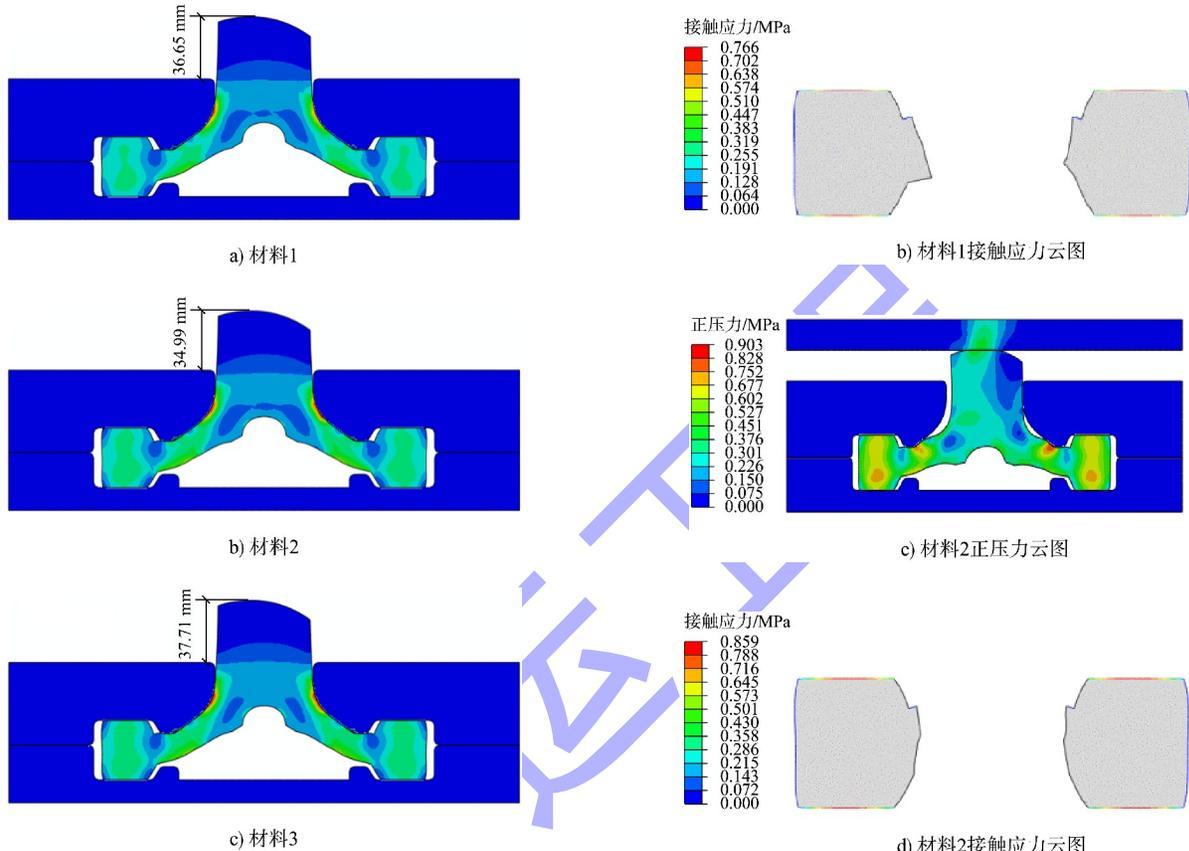


图 3 背水压力为 0.3 MPa 时充压止水封头自由外伸量

2.2 背腔密闭性

充压止水装置背腔的密闭性主要取决于两个翼头受压面接触应力的大小，背腔密闭性分析计算选取最不利荷载组合，即压板与止水面板间隙取 20 mm，作用在封头上的库水压取 20 m，背腔充压为 0.3 MPa，主要计算结果如图 4 所示。

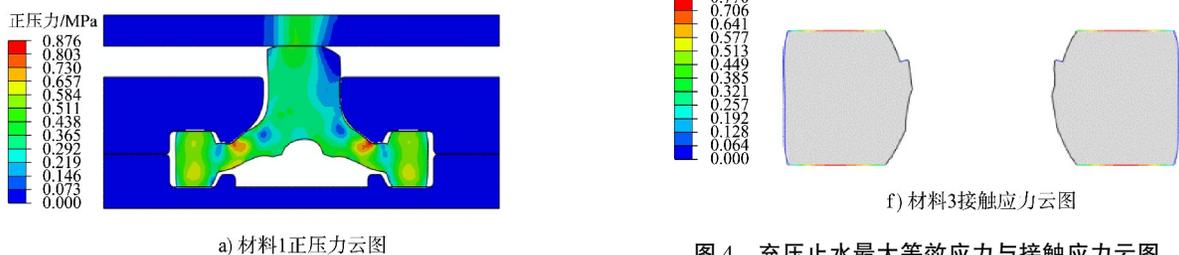


图 4 充压止水最大等效应力与接触应力云图

由图 4 可知, 充压止水在工作阶段, 3 种止水橡胶材料最大正压力分别为 0.876、0.903、0.819 MPa, 均远小于橡胶材料的扯断强度; 3 种止水橡胶材料两翼头与压板、座板的最大接触应力分别为 0.766、0.859、0.770 MPa, 均大于背腔最大充压压强 0.30 MPa, 背腔满足密闭性要求。

2.3 封头水密性计算分析

在背水压力、库水压力作用下, 充压止水封头与止水面板之间具有一定的接触应力和接触宽度才能保证充压止水达到封水要求。分析 3 种不同止水橡胶材料封头的水密性, 在充压止水安装后压板与止水面板间隙为 20 mm、库水压力由 0 MPa 变化到 0.20 MPa 工况下, 计算充压止水背水压力以及止水橡胶封头的接触应力和接触宽度, 结果见表 3。由表可知, 背水压力达到 0.22 MPa 时, 3 种止水橡胶材料封头最大接触应力分别为 0.436、0.420、0.419 MPa, 接触宽度分别为 22.70、22.18、24.50 mm, 可保证充压止水封头的水密性。

表 3 3 种止水橡胶材料计算参数

橡胶材料	库水压力/MPa	背水压力/MPa	接触应力/MPa	接触宽度/mm
材料 1	0	0.06	0.117	11.60
	0.1	0.12	0.220	15.40
	0.2	0.22	0.436	22.70
材料 2	0	0.06	0.081	10.10
	0.1	0.12	0.228	14.86
	0.2	0.22	0.420	22.18
材料 3	0	0.06	0.113	11.06
	0.1	0.12	0.240	17.32
	0.2	0.22	0.419	24.50

2.4 动态仿真分析

下闸首工作门调整门位时, 内侧充压止水依旧处于工作状态, 即充压止水橡胶封头在止水面板上滑动时, 背水压力不卸载。为充分了解充压止水在闸门启闭过程中产生的摩阻力及封头的偏移情况, 需对 3 种不同止水橡胶材料的动态工作过程进行模拟计算。计算时压板与止水面板间隙

取 20 mm, 作用在封头上的库水压力取 20 MPa, 背腔充压取 0.3 MPa, 以止水面板移动模拟闸门启闭动作, 不同工况下充压止水受力状态如图 5 所示。

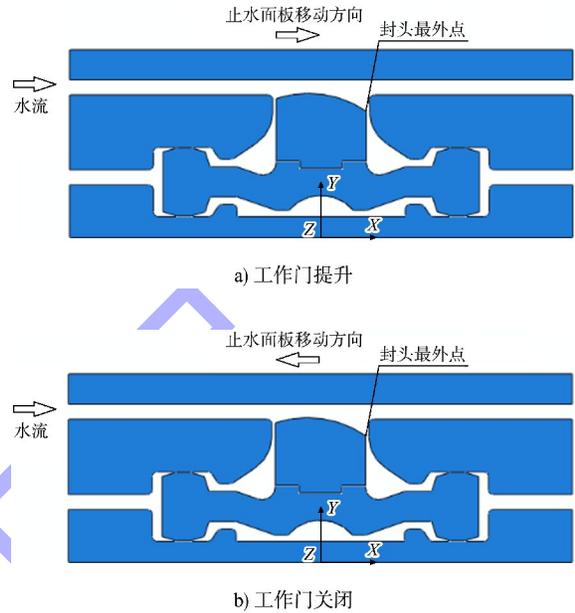
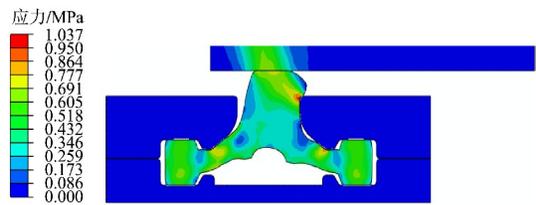
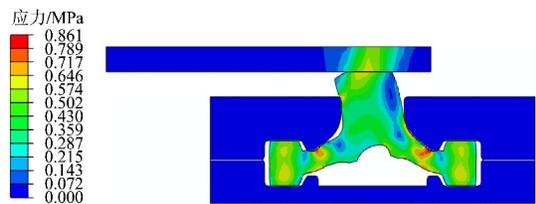


图 5 不同工况下充压止水受力状态

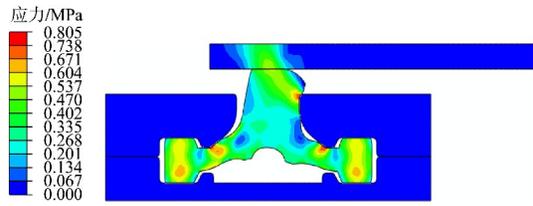
当止水面板移动时, 充压止水封头的变形随着水封的移动而不断变化, 当止水面板移动一定距离后, 封头的变形逐渐达到稳定。以封头最外点为参考点, 以止水面板移动前和移动至稳定状态时参考点的水平偏移量作为封头偏移量, 止水面板移动方向与水流方向相同和相反时, 分别计算得到止水面板移动至充压止水封头变形达到稳定后的最大正应力和摩阻力, 见图 6、7。



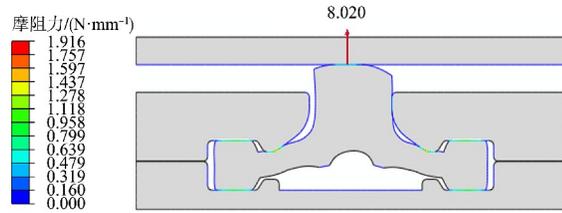
a) 材料1止水面板移动与水流方向相同



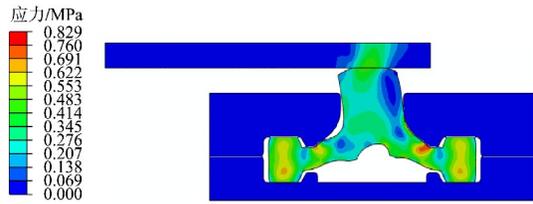
b) 材料1止水面板移动与水流方向相反



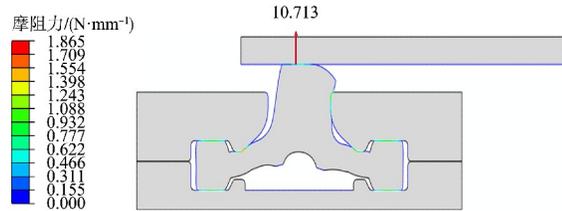
c) 材料2止水面板移动与水流方向相同



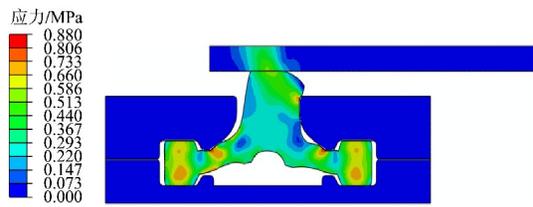
c) 材料2止水面板移动前



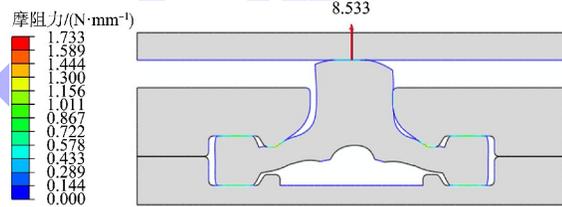
d) 材料2止水面板移动与水流方向相反



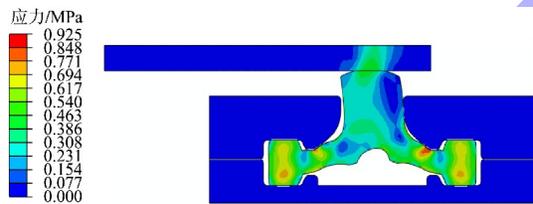
d) 材料2止水面板移动后



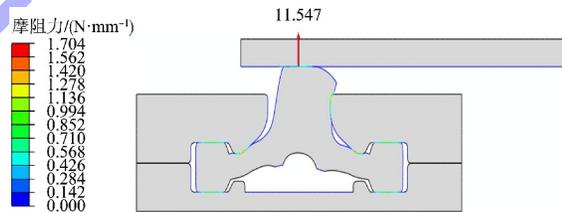
e) 材料3止水面板移动与水流方向相同



e) 材料3止水面板移动前



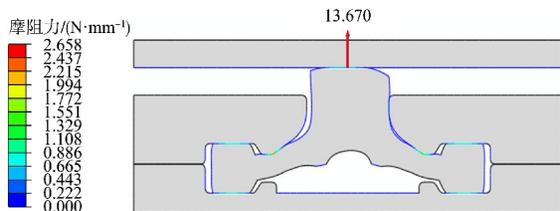
f) 材料3止水面板移动与水流方向相反



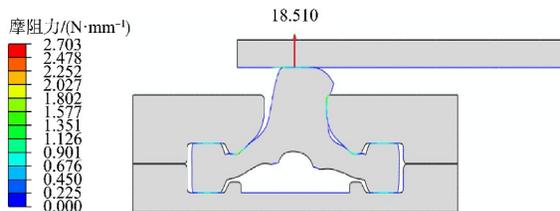
f) 材料3止水面板移动后

图6 充压止水动态最大正应力云图

图7 充压止水最大摩擦力



a) 材料1止水面板移动前



b) 材料1止水面板移动后

由图6、7可见，3种不同止水橡胶材料止水面板移动与水流方向一致时封头的最大正压力和偏移量分别为1.037 MPa、9.09 mm，0.805 MPa、7.09 mm，0.880 MPa、7.91 mm，止水面板移动与水流方向相反时封头的最大正压力和偏移量分别为0.861 MPa、-9.06 mm，0.829 MPa、-1.55 mm，0.925 MPa、-4.29 mm，均远小于止水橡胶材料的扯断强度，因此在下闸首工作门启闭过程中充压止水不会发生强度破坏现象。3种不同止水橡胶材料在止水面板移动前后的摩擦力分别为13.670、18.510，8.020、10.713，8.533、11.547 N/mm，止水面板移动后的封头摩擦力均大于移动前的摩

阻力,该值可作为止水设计时下闸首工作门启闭过程止水摩阻力计算的参考值。

3 结论

1) 根据计算结果,3种不同橡胶材料的充压止水背腔密闭性均满足要求,翼头接触应力比较接近,在背压达到0.06 MPa时,对应于最大库压20 m水头、0.3 MPa的背压设定值,各方案均能保证止水橡胶封头均满足水密性要求,其中材料2方案的封头正压力、偏移量、摩阻力均最小,即动态工作性能较优。

2) 实际工程运用中,背腔密闭性与止水安装精度、止水接头硫化胶合质量等因素相关,因此,从制造工艺分析,相较于原止水方案的止水橡胶封头和肢体采用不同橡胶材料,材料2方案和材料3方案能有效降低止水橡胶的制造难度。材料2方案中橡胶材料硬度较大,其封头偏移量较小,动态工作性能更优。综合比较,推荐材料2方案作为下闸首工作门充压止水橡胶材料。

参考文献:

- [1] 闫晓青,向化雄,龚国庆,等.三峡升船机上闸首工作门止水结构数值模拟与优化改造[J].水电能源科学,2017,35(6):167-171.
- [2] WANG X, LUO S Z, HU Y A, et al. High-speed flow erosion on a new roller compacted concrete dam during construction [J]. Journal of hydrodynamics (B), 2012, 24(1): 32-38.
- [3] 闫晓青,汤伟毕,陈露露.橡胶水封接头可靠性提高技术与性能试验[J].水运工程,2023(1):132-136.
- [4] 闫晓青,覃露,王洋.三峡升船机船厢门侧止水应力特性数值模拟及结构优化[J].水运工程,2023(8):127-133.
- [5] 长江三峡通航管理局,南京金达橡塑制品有限公司.橡胶水封用胶料及其制备成型方法和设备,中国. CN202010762741.9[P].2020-11-13.
- [6] 薛小香,吴一红,李自冲,等.高水头平面闸门P型水封变形特性及止水性能研究[J].水力发电学报,2012,31(1):56-61,92.
- [7] 中国葛洲坝集团机电建设有限公司.水电水利工程钢闸门制造安装及验收规范:DL/T 5018—2004[S].北京:中国标准出版社,2004.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第130页)

参考文献:

- [1] 王彪,何飞飞,王效远,等.弯曲窄槽型河段多线船闸通航水流条件研究[J].水运工程,2021(4):108-115.
- [2] 颜志庆,赵建钧,辜晋德,等.“S”形急弯河段通航水流条件研究[J].水运工程,2021(6):128-134.
- [3] 程璐,赵建钧,辜晋德.S形弯曲河段低水头闸坝枢纽口门区通航水流条件研究[J].水运工程,2016(12):106-112.
- [4] 张羽,杨朝辉,赵集云,等.弯曲河段船闸引航道通航水流条件模拟[J].水运工程,2022(6):132-138.
- [5] 吴惠国,孙逸豪,史英标,等.曹娥江清风船闸引航道通航水流条件[J].水运工程,2022(4):138-145.
- [6] 杨忠超,魏涛涛,黄秋杰.麻石船闸改扩建工程下引航道优化布置数值模拟[J].水运工程,2018(5):127-131,144.
- [7] 陈明,李初民,王多银,等.左江山秀船闸改扩建工程引航道通航水流条件[J].水运工程,2021(11):66-73.
- [8] 苏莹,付菁,张春泽,等.北江清远枢纽三线船闸通航水流条件及优化措施[J].水运工程,2022(6):150-157,189.
- [9] 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.
- [10] 刘芷妍,李艳.浅谈引航道口门区导航墙型式及应用[J].珠江水运,2021(8):78-79.
- [11] 吴越,杨校礼,李昱,等.弧形短导航墙对船闸下游引航道内水流结构的影响[J].长江科学院院报,2020,37(6):81-84,93.
- [12] 齐庆辉,曲红玲,东培华,等.韩庄双线船闸下游引航道水力特性模拟研究[J].水运工程,2015(9):117-122.
- [13] 陈明慧,刘筹资,夏波,等.青山枢纽船闸上游口门区通航水流条件优化试验研究[J].水运工程,2022(9):122-127.
- [14] 李君,赵建钧,洪娟,等.船闸凹岸布置上下游引航道水流条件优化[J].水运工程,2016(12):101-105,131.

(本文编辑 赵娟)