



三峡升船机船厢门侧止水应力特性 数值模拟及结构优化^{*}

闫晓青，覃 露，王 洋

(长江三峡通航管理局，湖北 宜昌 443000)

摘要：为查明三峡升船机船厢门侧止水聚四氟乙烯减摩层敷面磨损原因，根据船厢门实际运行工况，建立船厢门侧止水非线性有限元计算模型，通过模拟船厢门挡水与启闭工况，分析计算了不同橡胶材料和预压缩量对船厢门侧止水 P 头的最大接触应力、正压力及最大偏移量的影响。结果表明，船厢门侧止水 P 头的接触应力、正压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预压缩量的增加而增大，特别是预压缩阶段，正压力随着预压缩量的增加而显著增大。最后提出，通过优化侧止水橡胶材料、减小预压缩量等方法可减缓船厢门侧止水聚四氟乙烯减摩层敷面的磨损。

关键词：三峡升船机；船厢门；止水；橡胶材料；预压缩量；结构优化

中图分类号：U642.7

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)08-0127-07

Numerical simulation of stress characteristics and structural optimization of Three Gorges ship lift chamber gate water seal

YAN Xiaoqing, QIN Lu, WANG Yang

(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443000, China)

Abstract: To ascertain the cause of the wear of the PTFE anti-friction layer on the chamber gate of the Three Gorges ship lift, a nonlinear finite element calculation model of the water seal of the chamber gate is established according to the actual operating conditions of the chamber gate. By simulating the water retaining and operating conditions of the chamber gate, the effects of different rubber materials and pre-compression on the maximum contact stress, positive pressure and maximum offset of the ship chamber gate water seal are calculated. The results show that the contact stress, normal stress and maximum offset of the chamber gate decrease with the decrease of the hardness of the rubber material. The lower the water head is, the higher the sensitivity of the material hardness is. The contact stress and normal pressure increase with the increase of the pre-compression. Especially in the pre-compression stage, the normal pressure of the water seal increases significantly with the increase of the pre-compression. Finally, it is proposed to slow down the wear of the water seal PTFE anti-friction layer on the chamber gate by optimizing the water seal rubber material and reducing the pre-compression.

Keywords: Three Gorges ship lift; chamber gate; water seal; rubber material ; pre-compression; structural optimization

橡胶止水是保证水工闸门正常运行及封水效果的关键部件。由于橡胶自身特性导致其摩擦系

数较大，橡胶止水工作状态下与止水座板接触，橡胶止水受压缩而产生蠕变，接触面积变宽增大

收稿日期：2022-11-06

*基金项目：国家重点研发计划项目（2016YFC0402007）

作者简介：闫晓青（1986—），男，硕士，高级工程师，从事船闸升船机运维技术及管理研究。

了闸门启闭过程中的摩擦阻力，特别是闸门在启闭动作开始的瞬间，橡胶止水有直接被撕裂或扯断的风险^[1-4]。三峡升船机船厢门侧止水安装在弧形面板的两侧，采用Ω形橡胶止水，表面敷贴聚四氟乙烯减摩层，船厢门侧止水设计安装时考虑5 mm的预压缩量，以满足闸门在正常挡水工作和启闭过程中的封水要求。通航运行过程中发现，船厢门侧止水预压缩产生的预压缩力使船厢门启闭过程中橡胶止水与止水座板接触产生较大摩擦力，且升船机船厢门较常规水工闸门的运行频率高得多，船厢门侧止水表面贴敷的聚四氟乙烯减摩层磨损严重，且部分聚四氟乙烯减摩层与橡胶止水基体黏接面出现开裂、“竹节”等现象^[5-8]。鉴于此，本文从橡胶止水材料和预压缩量两方面对船厢门侧止水进行数值模拟计算和分析研究，

最终提出较优的船厢门侧止水材料和安装预压缩量，旨在为三峡升船机船厢门侧止水优化改造提供理论依据。

1 不同止水橡胶材料仿真分析

三峡升船机船厢门的设计最大挡水水头为4 m，属于低水头闸门，对止水材料的硬度要求较低，低水头闸门常用的止水橡胶材料为SF6674和SF6474。目前船厢门侧止水基体橡胶材料为SF6674，表面敷贴聚四氟乙烯(PTFE)。根据调研与前期大量试验结果，拟采用2种硬度偏小的橡胶材料SF6474和SD007作为船厢门侧止水材料，并根据实际运行工况，对船厢门侧止水进行仿真计算和对比分析。3种橡胶止水SF6674、SF6474、SD007的机械物理性能见表1。

表1 3种橡胶止水物理机械性能指标

止水材料	硬度(邵A)/度	拉伸强度/MPa	拉断伸长率/%	脆性温度/℃	密度/(g·cm ⁻³)	黏接强度/(kN·m ⁻¹)
SF6674	60±5	≥18	≥450	≤-40	1.1~1.3	6
SF6474	60±5	≥13	≥450	≤-40	1.1~1.3	6
SD007	45±5	≥22	≥600	≤-40	1.1~1.3	6

1.1 数值模拟方法

为得到不同橡胶材料作为船厢门侧止水时的应力应变特性，采用有限元分析软件Abaqus对不同橡胶材料的船厢门侧止水分别进行非线性仿真计算，包括挡水工作状态和启闭状态下侧止水的应力和应变。挡水状态下侧止水的计算近似按平面问题处理，采用二维平面模型；启闭状态下侧止水的计算采用三维实体模型。1) 二维平面模型中，止水橡胶材料采用八结点平面应变杂交单元，压板、基座和止水座板采用八结点平面应变弹性单元，2种类型单元的每个结点有x、y两个方向的自由度^[9-11]。坐标系取水平(水流)方向为x，垂直方向为y。止水压板和止水基座沿x、y方向设置位移约束，止水座板y向位移5 mm。2) 三维立体模型中，止水橡胶材料采用八结点线性六面

体杂交单元，压板、基座和止水座板采用八结点线性六面体单元，2种类型单元的每个结点有6个自由度。坐标系取水平(水流)方向为x，垂直向为y，止水座板(闸门)运动方向为z。

橡胶止水与止水压板、止水基座、止水座板均有接触，共设置3组接触对。模拟船厢门运动时，止水座板z向移动。船厢门挡水工作状态下，止水承受库压为0.04 MPa；启闭状态下，船厢门侧止水承受的库压取0~0.04 MPa。船厢门侧止水预压缩量为5 mm，侧止水表面的聚四氟乙烯敷面与钢板接触的摩擦系数取0.2，其他部位橡胶止水与钢板接触的摩擦系数取0.5，采用Mooney-Rivlin公式对3种橡胶材料试验数据进行拟合，得到3种止水橡胶材料的计算参数见表2。

表2 3种橡胶止水材料的计算参数

止水 材料	橡胶材料拟合参数					与钢板摩擦 系数 f	泊松比
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}		
SF6674	0.531 4	-0.004 5	0.044	-0.032 4	0.014 7	0.5/0.2	0.499 67
SF6474	0.159 6	0.263 8	0.025 4	-0.012 2	-0.003 5	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

注: 采用二阶五项模型计算, C_{10} 、 C_{01} 、 C_{20} 、 C_{11} 、 C_{02} 均为橡胶材料超弹性参数值, 其中下标由应变能函数模型决定。

1.2 挡水状态

船厢门挡水状态下, 主要计算在 5 mm 预压缩量和 0.04 MPa 挡水水头作用下不同橡胶材料侧止水的应力和应变情况。船厢门侧止水为 Ω 形橡胶止水, 可进行双向止水, 侧止水断面见图 1, 有限元计算模型见图 2。

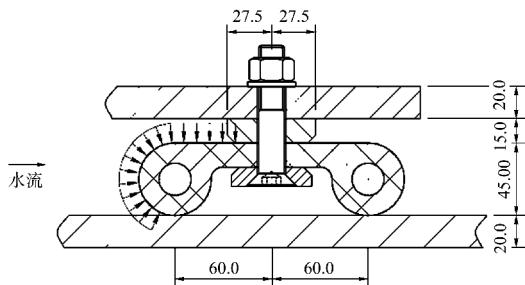
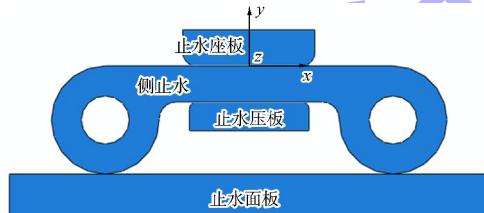
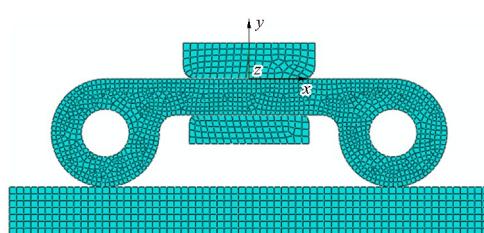


图1 船厢门侧止水断面(单位: mm)



a) 二维平面模型

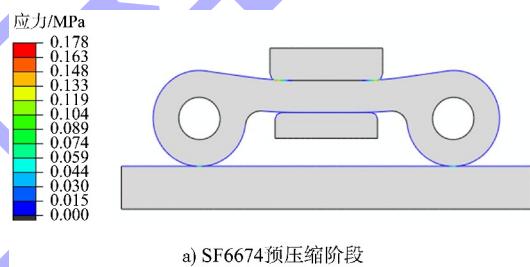


b) 计算模型网格划分

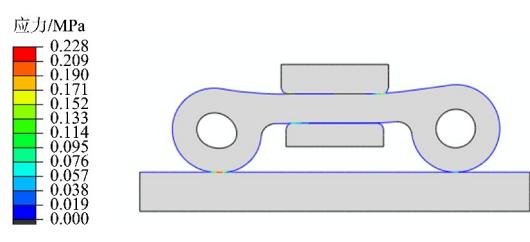
图2 船厢门侧止水有限元计算模型

计算分 2 个阶段, 一是预压缩阶段, 止水座板 y 向平移完成 5 mm 的预压缩量; 二是水压加载, 在止水橡胶 P 头对应处施加 0.04 MPa 的水压力。侧止水应力的计算内容主要为 P 头与止水面

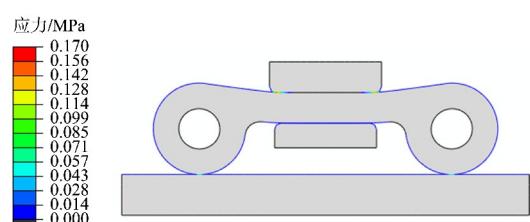
板的接触应力, 并将计算所得的接触应力进行积分, 得到侧止水的正压力。止水应变的计算内容主要为 P 头的偏移量, 以止水变形后 P 头与止水面板接触的最远点与 P 头原几何中心的水平距离作为 P 头的输出偏移量。在挡水状态下, 不同止水橡胶材料接触应力和正压力计算云图如图 3、4 所示, 应力和应变计算结果见表 3。



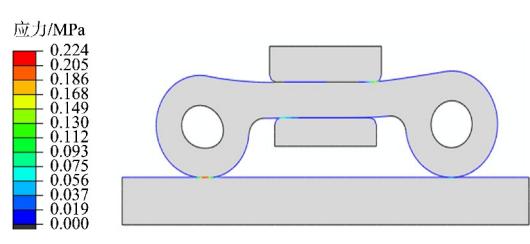
a) SF6674预压缩阶段



b) SF6674挡水阶段



c) SF6474预压缩阶段



d) SF6474挡水阶段

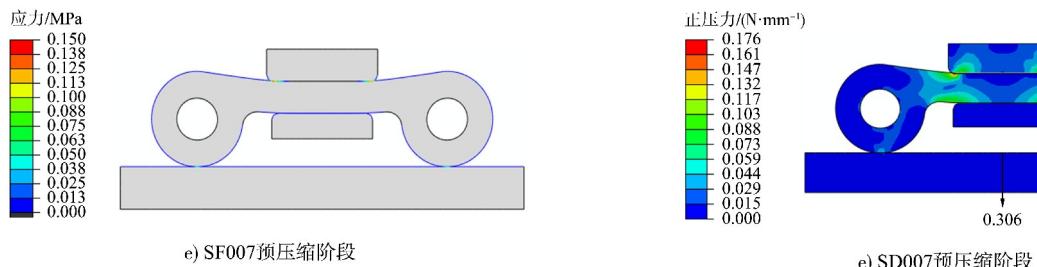


图 3 船厢门侧止水接触应力

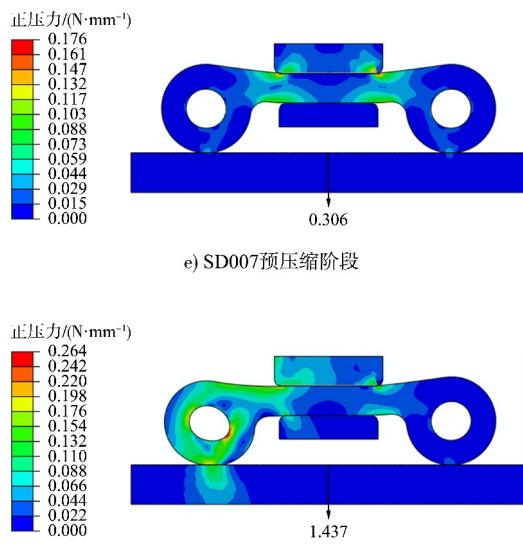
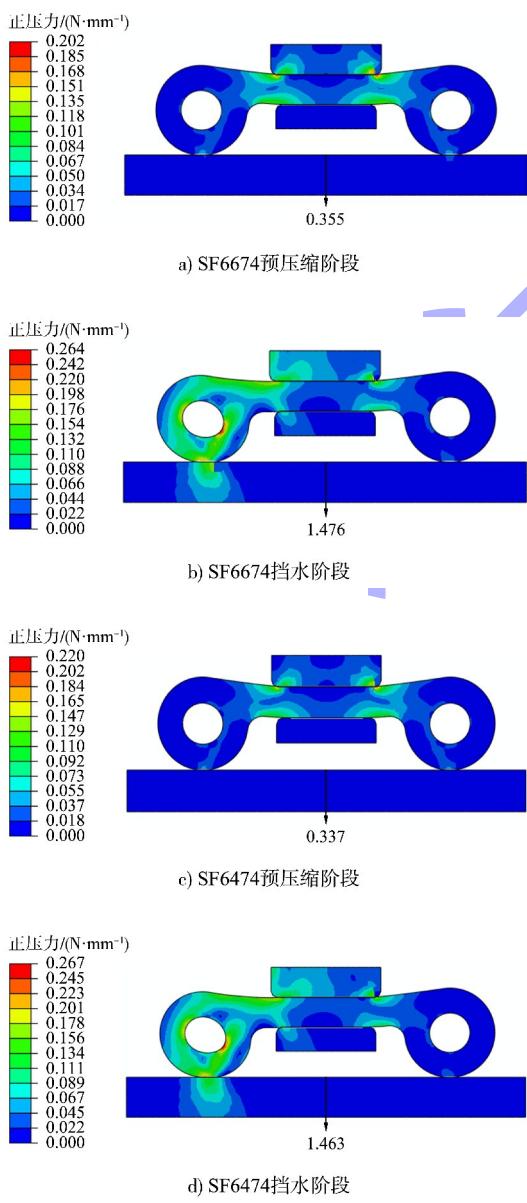


图 4 船厢门侧止水正压力

表 3 3 种橡胶材料船厢门侧止水有限元计算结果

止水材料	P头最大接触应力/MPa	P头最大偏移量/mm	侧止水正压力/(N·mm⁻¹)	
	预压缩阶段	挡水阶段	预压缩阶段	挡水阶段
SF6674	0.079	0.228	3.69	0.355
SF6474	0.076	0.224	3.63	0.337
SD007	0.067	0.210	3.45	0.306

由图 3、4 和表 3 可知, 船厢门侧止水 P 头的接触应力、最大偏移量和正压力均随止水橡胶材料的硬度降低而略有减小。对比 SF6474 和 SF6674, 挡水时 P 头接触应力减小约 1.8%, 正压力减小约 0.8%, 不会影响船厢门侧止水的封水效果; P 头最大偏移量减小约 1.7%, 由于 P 头与止水面板预压缩, 不存在间隙, P 头总体偏移量均不大, 该变形对止水性能影响不大; 同理, 对比 SD007 和 SF6674, 预压缩和挡水时 P 头接触应力减小约 7.9%, 侧止水正压力减小约 2.6%, 不会影响船厢门侧止水的封水效果; P 头最大偏移量减小约 6.5%, 由于 P 头与止水座板预压缩, 不存在间隙, P 头总体偏移量均不大, 该变形对止水性能影响不大。

1.3 启闭状态

船厢门在开启时需要克服的摩擦阻力最大, 用止水座板的移动模拟船厢门的开启过程时, 随着止

水座板移动距离的增加, 止水封头的变形逐渐增大, 止水座板对封头的摩擦阻力也逐渐增大。当止水座板移动距离增加到一定程度($<1\ 000\ \text{mm}$)时, 止水封头的变形逐渐趋于稳定, 止水座板对封头的摩擦阻力也逐渐趋于稳定。因此, 对不同橡胶材料的船厢门侧止水均计算在5 mm预压缩量和0~0.04 MPa的挡水水头下止水座板对封头的摩擦阻力。

根据船厢门侧止水及启闭过程中的受力和变形特点, 船厢门侧止水需采用三维模型进行模拟, 止水长度方向取1 000 mm。计算中采用止水座板的移动模拟船厢门的启闭过程, 因此止水座板长度方向取2 000 mm, 其有限元模型如图5所示。

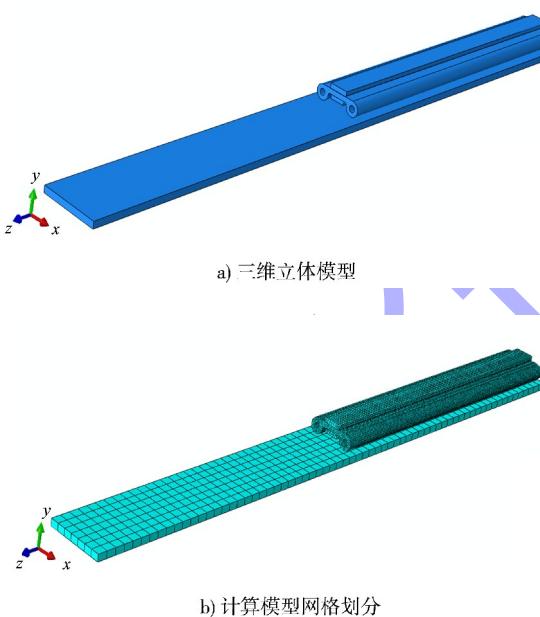


图5 船厢门侧止水启闭状态有限元计算模型

计算分2个步骤, 一是预压缩阶段, 止水面板y向平移完成5 mm的预压缩量; 二是水压加载和止水面板移动, 在止水橡胶P头对应处施加0~0.04 MPa的水压力, 止水面板z向移动1 000 mm。启闭状态下止水计算主要关注止水面板滑动过程中侧止水上的应力状态, 船厢门侧止水在0.04 MPa的水压力作用下的正压力计算云图如图6所示, 正压力计算结果见表4。

表4 3种橡胶材料船厢门侧止水正压力有限元计算结果

止水 材料	侧止水正压力/(N·mm ⁻¹)				
	0 MPa	0.01 MPa	0.02 MPa	0.03 MPa	0.04 MPa
SF6674	410.9	692.1	1 048.5	1 399.7	1 745.7
SF6474	392.1	676.9	1 032.7	1 383.1	1 729.5
SD007	347.7	640.4	995.2	1 343.8	1 691.6

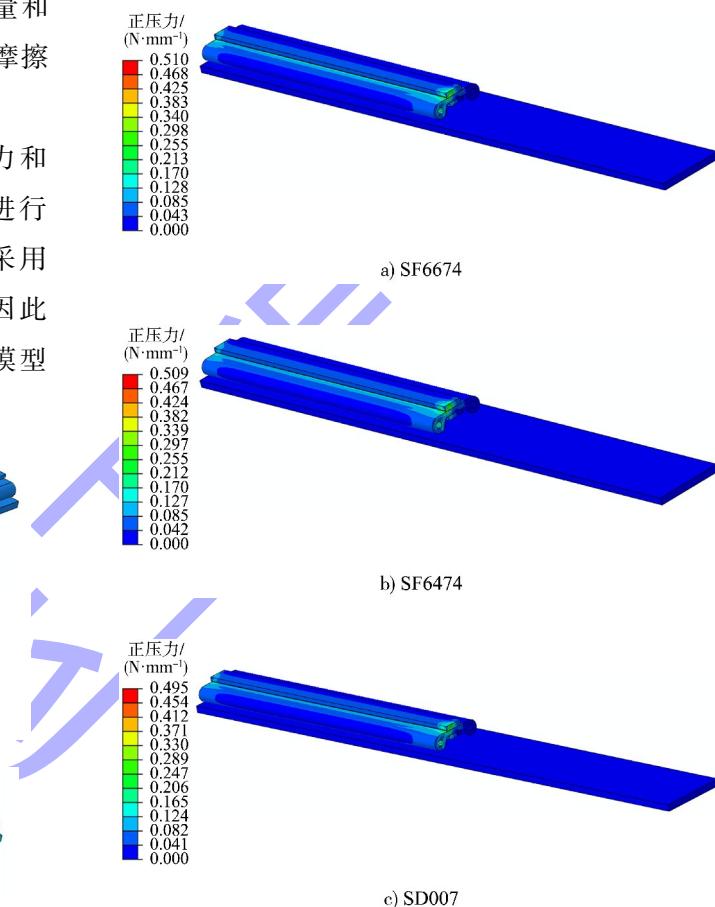


图6 船厢门侧止水正压力云图

由图6和表4可知, 船厢门侧止水正压力随着橡胶材料硬度的降低而减小, 且挡水水头越低, 材料的敏感程度越高。对比SF6474和SF6674两种橡胶材料, 无水压差时, 正压力减小约4.5%; 挡水水头为0.04 MPa时, 正压力减小约0.9%。同理对比SD007和SF6674两种橡胶材料, 无水压差时, 正压力减小约15.4%; 挡水水头为0.04 MPa时, 正压力减小约3.1%。

2 不同止水预压缩量仿真分析

2.1 数值模拟方法

对不同预压缩量下的船厢门侧止水在挡水状

态和启闭状态分别进行非线性仿真计算。挡水状态下侧止水的计算近似按平面应变问题处理，采用二维平面模型；启闭状态下，侧止水的计算采用三维实体模型，计算时船厢门侧止水预压缩量分别选取1、2、3、4、5 mm。船厢门挡水工作状态下，止水承受库压为0.04 MPa；启闭状态下，船厢门侧止水承受的库压取0~0.04 MPa。计算时选取船厢门侧止水现用橡胶材料SF6674，单元划分、约束、载荷等与不同止水橡胶材料仿真分析相同。

2.2 挡水状态

计算分2个步骤，一是预压缩阶段，止水座板 y 向平移完成0~5 mm的预压缩量；二是水压加载，在止水橡胶P头对应处施加0.04 MPa的水压力。船厢门侧止水不同预压缩量仿真计算的主要内容为P头与止水面板的接触应力和接触宽度，并将计算所得的接触应力进行积分，得到船厢门侧止水的正压力。船厢门侧止水3 mm预压缩量时有限元计算正压力云图如图7、8所示，接触应力和正压力计算结果见表5。

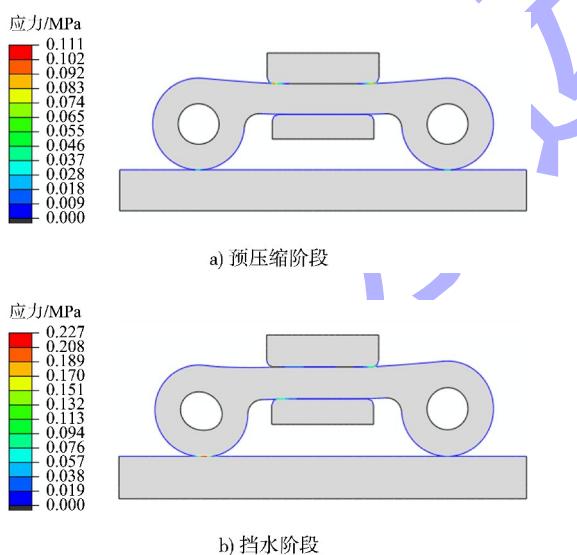


图7 船厢门侧止水预压缩3 mm时P头接触应力云图

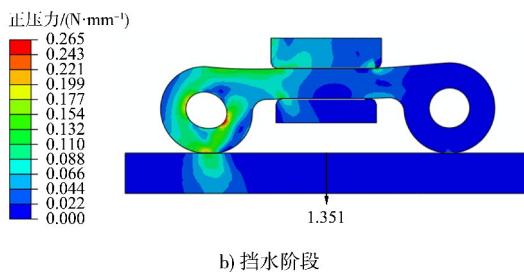
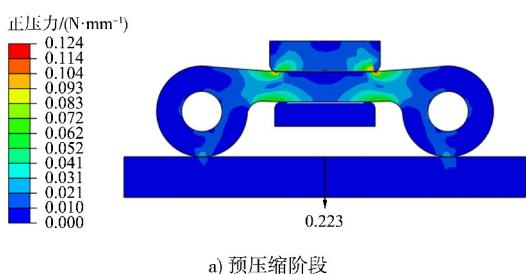


图8 船厢门侧止水预压缩3 mm时P头正压力云图

表5 不同预压缩量下侧止水计算结果

预压缩量/mm	P头最大接触应力/MPa		P头正压力/(N·mm ⁻¹)	
	预压缩阶段	挡水阶段	预压缩阶段	挡水阶段
1	0.017	0.227	0.077	1.220
2	0.037	0.227	0.151	1.287
3	0.049	0.227	0.223	1.351
4	0.058	0.227	0.290	1.413
5	0.079	0.228	0.355	1.476

由图7、8和表5可知，船厢门侧止水P头的接触应力和正压力均随预压缩量的增加而增大，特别是预压缩阶段或在无水压差的工况下，侧止水的正压力随着预压缩量的增加而显著增大，故减小预压缩量能降低侧止水的摩阻力。同时考虑到船厢对接密封框充水和船厢门启闭过程中水压差尚未建立，为保证船厢门的止水效果，侧止水预压缩阶段P头最大接触应力不宜小于0.04 MPa，故侧止水的预压缩量不宜小于3 mm。

2.3 启闭状态

在船厢门启闭过程，对不同预压缩量的船厢门侧止水计算0~0.04 MPa的挡水水头下止水座板对封头的摩擦阻力。根据表5的分析计算结果，启闭状态计算采用的预压缩量为3、4、5 mm。计算分2个步骤，一是预压缩阶段，止水座板 y 向平移完成3~5 mm的预压缩量；二是水压加载和止水座板移动，在止水橡胶P头对应处施加0~0.04 MPa的水压力，止水面板 z 向移动1 000 mm。启闭状态下船厢门侧止水计算主要关注止水座板滑动过程中侧止水上的应力状态。3种预压缩量时船厢门侧止水0.04 MPa水头作用下的有限元计算正压力云图如图9所示，正压力计算结果见表6。

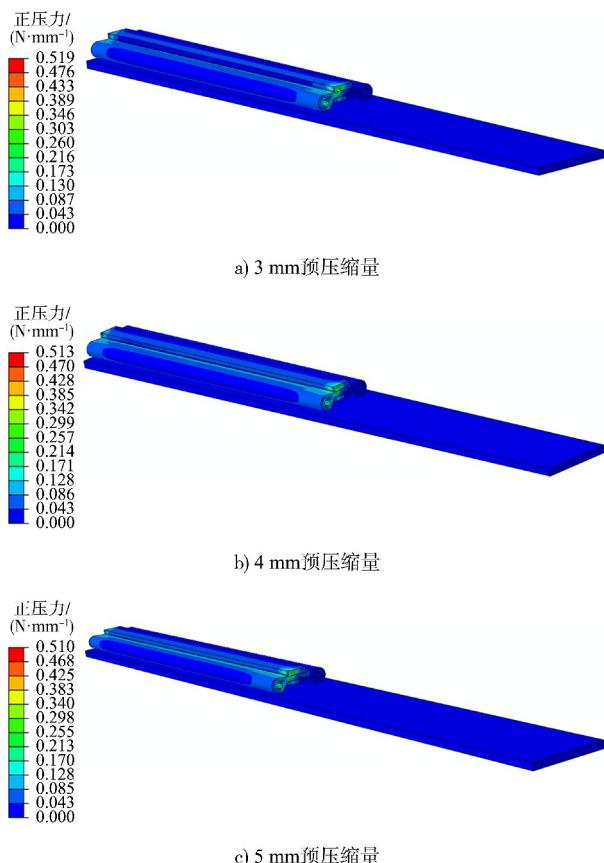


图9 不同预压缩量时船厢门侧止水正压力云图

表6 不同预压缩量侧止水正压力计算结果

预压缩量/mm	侧止水正压力/(N·mm⁻¹)				
	0 MPa	0.01 MPa	0.02 MPa	0.03 MPa	0.04 MPa
3	273.7	590.3	937.9	1 274.5	1 612.2
4	363.0	645.6	998.4	1 341.5	1 684.0
5	410.9	692.1	1 048.5	1 399.7	1 745.7

由图9和表6可知, 船厢门侧止水正压力随着预压缩量的增大而增加, 且挡水水头越低, 正压力对预压缩量的敏感程度越高。对比3 mm和5 mm两种预压缩量, 无水压差时, 正压力增加约50.1%; 挡水水头为0.04 MPa时, 正压力增加约8.4%。

3 结论

1) 根据本文对船厢门侧止水的有限元计算结果, 发现船厢门侧止水P头的接触应力、最大偏移量和正应力均随着橡胶材料的硬度降低而减小, 挡水水头越低, 对材料硬度的敏感程度越高, 故改变橡胶材料硬度对降低侧止水P头磨损有一定作用。根据橡胶止水制造经验, 结合前期大量试验, 综合评估认为, 侧止水橡胶材料SF6474硬度

较低、制造工艺纯熟, 且与聚四氟乙烯的贴敷性能良好, 建议选用。

2) 根据船厢门侧止水不同预压缩量分析结果, 船厢门侧止水P头的接触应力和正压力均随着预压缩量的增加而增大, 特别是预压缩阶段或在无水压差的工况下, P头的正应力随着预压缩量的增加而显著增大, 同时考虑船厢门启闭过程中船厢门侧止水的封水要求, 选择侧止水预压缩量为3 mm不仅能有效降低侧止水的摩阻力, 还能保证船厢门各阶段的封水效果。因此, 结合船厢门实际运行工况, 建议船厢门侧止水预压缩量采用3 mm。

参考文献:

- [1] 熊润娥, 严根华. 水工闸门止水结构动力特性与体型优化[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(6): 798-802, 818.
 - [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] 李家熹. 阀门止水装置可靠性与失效分析[J]. 水运工程, 1992(11): 33-36, 13.
 - [4] 刘礼华, 雷艳, 方寒梅, 等. 自封闭式高压闸门水封的试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(6): 714-718.
 - [5] 长江三峡通航管理局. 橡胶水封用胶料及其制备成型方法和设备: 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] 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.
 - [8] 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.
 - [9] 胡小玲, 刘秀, 李明, 等. 炭黑填充橡胶超弹性本构模型的选取策略[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 34-42, 48.
 - [10] 中橡集团沈阳橡胶研究设计院. 硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定: GB/T 528—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
 - [11] 广东省计量科学研究所. 橡胶袖珍硬度计压入硬度试验方法: GB/T 531—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- (本文编辑 王传瑜)