

不同开度下深孔平面钢闸门支承约束模拟研究

张学东, 朱琳, 马彩霞

(山东省水利勘测设计院有限公司, 山东 济南 250014)

【摘要】深孔平面钢闸门的边界条件复杂,其支承约束状态的变化直接影响闸门的安全稳定运行。为研究不同开度下深孔平面钢闸门的支承约束状态,以某高水头深孔平面钢闸门为例,基于 ANSYS 有限元软件建立了闸门-主轨支承的三维有限元模型和顶、侧水封-止水座板的二维平面应变模型,系统分析了闭门挡水和启闭过程中闸门与门槽的接触特性,揭示了闸门不同开度下定轮、水封的接触应力、压力与接触状态等变化规律。研究成果可为该类闸门工程设计与安全评估提供有力依据。

【关键词】高水头;平面钢闸门;水封;定轮;接触状态

【中图分类号】TV663

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-06-0001-04

Simulation Study on Support Restraint of Deep-hole Flat Steel Gate under Different Opening Degrees

ZHANG Xuedong, ZHU Lin, MA Caixia

(Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy co., Ltd, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: Deep-hole flat steel gates feature complicated boundary conditions, and variation of support restraint directly affects the safe and stable operation of gates. To investigate the support restraint performance under different gate openings, a high-head deep-hole flat steel gate is taken as the research object. Based on ANSYS finite element software, a 3D finite element model for gate-main track support and a 2D plane strain model for top & side water seal and seal base plate are established. The contact characteristics between gate and gate slot under closed water retaining condition and gate opening-closing process are systematically analyzed, and the variation laws of contact stress, contact pressure and contact state of fixed wheels and water seals at different gate openings are revealed. The research results can provide reliable reference for structural design and safety assessment of similar gate projects.

Key words: High water head; Flat steel gate; Water seal; Fixed wheel; Contact state

近年来,随着国内外高坝大库的建设,作为水利水电工程泄水建筑物调节咽喉的水工钢闸门正朝着高水头、大孔口、大泄量的方向发展^[1]。闸门的边界条件较为复杂,水封与门槽止水座板相接触,保证闸门的密封性良好;定轮与门槽主轨相接触,提供闸门顺水流方向的支承约束。而在闸门工程实际运行中,高水头闸门水封漏水极易引起闸门振动和门槽的空蚀,威胁工程安全^[2],定轮作为平面钢闸门的主要支承体系,运行状态对河门的整体性能有重要影响^[3]。

深孔平面钢闸门在高水头作用下,其荷载与边界条件随闸门开度的变化而变化。由于水封、

定轮与门槽的接触状态为非线性,导致闸门实际的边界约束条件难以模拟^[4]。在闸门有限元分析时,常对模型的边界条件进行一定简化,即忽略门槽对面板水封的支承约束以及门槽主轨和定轮之间的接触状态,建立的闸门单体结构模型仅满足结构整体的静力特性计算,而无法对定轮部件以及水封的安全性态作出相应判断。为研究闸门在不同开度下支承约束状态的变化,通过工程实例运用 ANSYS 软件对某高水头深孔平面钢闸门进行闸门-门槽的接触状态模拟研究。

收稿日期:2025-08-20

作者简介:张学东(1994—),男,工程师

1 闸门有限元模型的建立

1.1 闸门基本参数

某大型水电厂泄水道布置于机组进水口左侧主坝坝段内,进口分为两孔,顺水流方向设置工作闸门,在洪水期配合溢洪道发挥泄洪作用。某高水头深孔闸门为潜孔式平面定轮钢闸门,闸门规格 $3.0 \times 8.0 - 70 \text{ m}$ (宽 $\times$ 高-水头)。闸门采用多主梁等高联接、简支滚轮支承的结构型式,共由上、中、下三节门叶组成,面板及水封均布置于上游侧,每节门叶均设有顶水封用于闸门局部控泄,其中上、中、下三节门叶的顶水封依次编号 1[#] 至 3[#],定轮沿高度方向依次编号 1[#] 至 6[#]。门叶材质为 Q345 钢,主支承采用高强度复合材料滑道。

1.2 闸门有限元模型

闸门是由面板、主次梁系、定轮等构件组合而成的空间薄壁结构,充分考虑空间效应,门叶结构采用板壳单元,定轮部件采用实体单元进行建模。根据闸门的结构形式和受力特点,采用 ANSYS 软件将闸门面板、主梁、水平次梁、竖直次梁以及边梁离散为 Shell181 单元,定轮离散为 Solid45 单元,建立闸门单体有限元模型。

为能准确计算出闸门定轮与门槽主轨的接触压力分布,在闸门单体结构模型的基础上添加门槽主轨构件,建立闸门整体接触模型。主轨采用 Solid45 实体单元网格划分,然后在定轮的轮缘表面生成一层接触单元,同时在与定轮相接触的主轨上表面生成一层目标单元,两者建立生成接触对,接触单元和目标单元分别选用 CONTA173 和 TARGE170。整体坐标系采用笛卡尔坐标系,X 方向为闸门宽度方向,Y 方向沿顺水流方向,Z 方向为铅直方向。

1.3 材料性能

闸门面板、梁系材料为 Q345 钢,弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,泊松比为 0.3,密度为 7850 kg/m^3 ;闸门定轮材料为 35CrMnSi 铸钢,主轨采用高强度复合材料,弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,泊松比为 0.3,密度为 7850 kg/m^3 。

1.4 荷载工况及边界条件

静力计算工况为闸门全关、闸门开度 1/8、1/4、1/2、3/4,共计 5 种工况,作用水头为 70 m。模

型施加的荷载仅考虑闸门承受的主要荷载,即静水压力和闸门自重。在不同开度工况下,顶水封的作用位置发生变化,作用水头的大小以及静水压力施加的范围也随之变化。顶水封作用位置如下:1)闸门全关、1/8 开度以及 1/4 开度工况下,1[#] 顶水封起止水作用;2)闸门 1/2 开度,2[#] 顶水封起止水作用;3) 闸门 3/4 开度,3[#] 顶水封起止水作用。对模型施加边界条件,在闸门门叶中轴线施加 X 向约束,在主轨底面施加 Y 向约束,全关工况下,在闸门门叶底缘施加 Z 向约束;局部开启工况下,在闸门吊耳施加 Z 向约束。

2 定轮与门槽的接触特性分析

为能够充分反映闸门顺水流方向真实的支承约束状态,考虑定轮与门槽主轨的非线性接触,对闸门整体有限元模型进行静力计算。在不同开度工况下提取定轮表面的接触单元查看分析结果,定轮表面的接触应力和接触压力分布分别如图 1、图 2 所示。

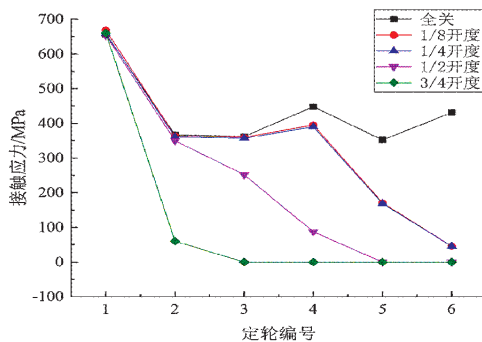


图 1 闸门不同开度工况下的定轮接触应力分布

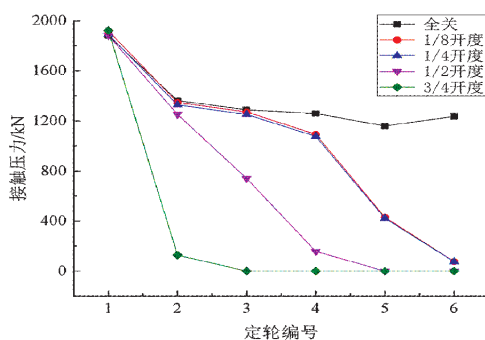


图 2 闸门不同开度工况下的定轮接触压力分布

经定轮与门槽主轨的接触分析,由图 1 可以看出,闸门在不同开度工况下定轮的接触应力沿高度方向逐渐减小,均是底轮的接触应力最大,符合水压荷载下闸门的应力分布规律;随着开度的增加接触应力大致呈现逐渐减小的趋势,其中

在 1/8 开度工况下底轮的接触应力达到最大,最大值为 669 MPa,虽然强度满足规范要求,但属于较为危险的工况。建议闸门在操作运行中,应着重加强在 1/8 小开度工况下底轮应力的检测,避免与主轨相接触的底轮应力过大产生裂纹而发生破坏。

根据 3 道横向水封在面板上作用的位置,即闸门全关、1/8 开度、1/4 开度下,第 1 道水封起止水作用;1/2 开度工况下第 2 道水封起止水作用;3/4 开度工况下,第 3 道水封起止水作用。随着闸门开度的增大,上节门叶结构逐渐不再承受水压力作用,故顶轮首先脱离主轨接触,其承受的接触应力逐渐减小,顺水流方向的约束主要由闸门底部定轮承担,上部定轮的支承约束作用逐渐丧失。由图 2 可以看出不同开度工况下门槽主轨对闸门定轮的接触压力分布,即门槽主轨对闸门定轮的支承约束反力。与定轮的接触应力分布规律相似,闸门在不同开度工况下定轮的接触压力沿高度方向逐渐减小,均是底轮的接触压力最大,其中 1/8 开度工况下底部定轮的接触压力达到最大,最大值为 1 909 kN。随后闸门开度继续增大,门叶上部各个定轮的接触压力逐渐减小,承受门槽主轨的支承约束作用也相应减弱,但底部定轮的接触特性变化不大。所以随着闸门开度的增大,顶部定轮对闸门的支承约束作用逐渐转移至底部定轮位置,即闸门顺水流方向的约束主要由底部定轮承受门槽主轨的支承约束作用。

3 水封与门槽的接触特性分析

3.1 面板位移计算

闸门的顶水封、侧水封均设置在面板上游侧,面板在水压力作用下顺水流方向产生一定的变形,致使水封的预压缩量发生变化,即实际预压缩量略小于设计预压缩量,不同的预压缩量影响水封与门槽止水座板的接触特性。

为探究不同开度工况下水封与门槽止水座板的接触特性,提取闸门面板在不同开度工况下对应水封位置的位移值,以闸门全关工况为例,面板位移分布如图 3 所示。

3.2 水封与止水座板的接触模型

图 4 为闸门 P 型水封断面图,为简化计算量,以图中红色区域为分析对象,在边界建立相

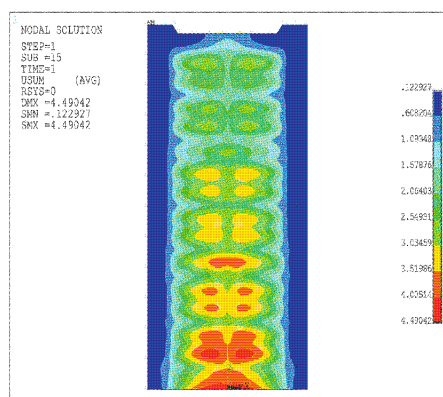


图 3 面板位移分布

应的约束条件代替被简化的部分。对于高水头平面闸门 P 型水封,其顶(侧)水封为直段,可以按二维平面应变问题处理^[9],二维有限元模型采用 8 结点平面应变 plane183 单元建模,并考虑到水封在承受载荷过程中 P 型水封与止水座板、P 型水封与压板的接触问题,将可能成为接触面的止水座板、压板创建为主面,对应的橡胶面创建为从面。P 型水封有限元模型如图 5 所示。

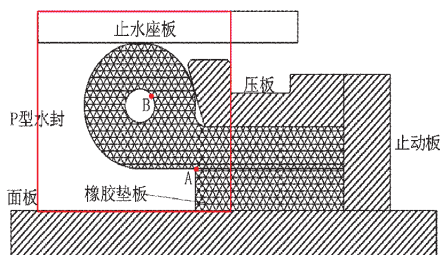


图 4 闸门 P 型水封断面图

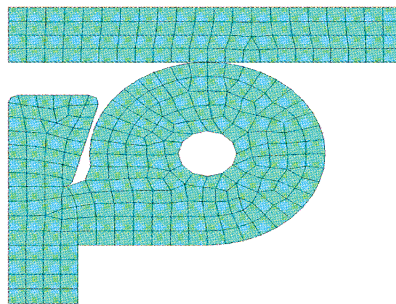


图 5 P 型水封有限元模型

P 型水封有限元计算采用多荷载步非线性迭代计算,整个分析通过以下两个计算过程来完成。荷载步 1:给定门槽密封面靠向水封的不同位移值来使密封产生一定预压缩量(预压缩量=原设计预压缩量-闸门面板水封处的变形量)。荷载步 2:P 型水封圆头的上游侧及下游侧分别施加一定大小的水压(62~70 m 水头)。

3.3 水封与止水座板最大接触应力分布

水封与止水座板的接触应力反映了其自身的密封能力,通常将密封界面处的最大接触应力大于或等于工作压力作为密封有效的必要条件。图6为闸门顶水封沿闸门宽度的接触应力分布。由图6可知:沿着闸门宽度方向,接触应力先减小后增大,其中在闸门中轴线上,接触应力达到最小,为1.57 MPa,大于对应的水压值,说明P型水封均能发挥正常的密封功能;同一高程面上,闸门在水荷载和门槽主轨的支承约束作用下,中间的变形量大于两端的变形量,导致中轴线上水封预压缩量减小,接触应力最小。如果水压继续增大,则中轴线顶水封断面最容易漏水。

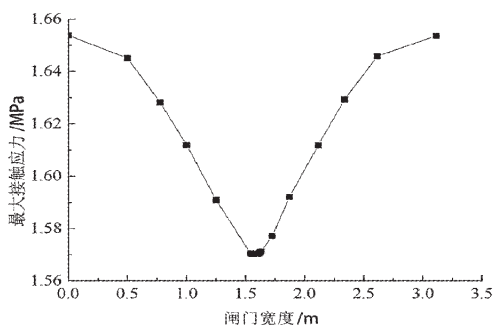


图6 顶水封沿闸门宽度最大接触应力分布

图7为闸门在不同开度工况下侧水封沿闸门高度的接触应力分布。由图7可知:沿着闸门高度从下向上,侧水封与门槽的最大接触应力呈波动变化,闸门靠下波动幅度较大,越往上波动越小,主要原因是闸门的结构布置和轮子支承约束情况。水封与门槽最大接触应力与预压缩量和水压均有关,水压沿着闸门高度从下向上线性减小,预压缩量呈波动变化,闸门侧水封靠下预压缩量较小;闸门在任一开度工况下,侧水封靠闸门底的最大接触应力均最小,开度越大,接触应力越小;闸门全开工况下,最小接触力约为1.62 MPa,大于对应的水压值,说明P型水封均能发挥正常的密封功能。

3.4 水封与止水座板总接触压力分布

图8为闸门顶止水沿闸门宽度的接触压力分布。其分布规律与接触应力分布图类似(图6),对该曲线沿横坐标积分可近似计算顶水封总的接触力,即图8分布力曲线与横纵坐标围成的面积即为总接触压力。经计算,顶水封的总接触压力为48.58 kN。

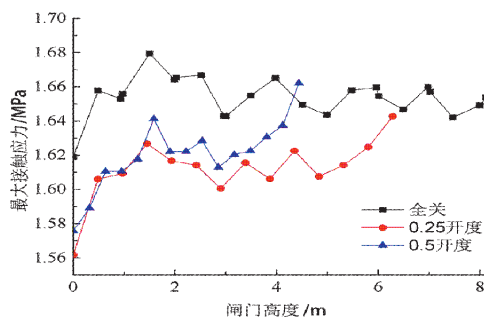


图7 侧水封沿闸门高度最大接触应力分布

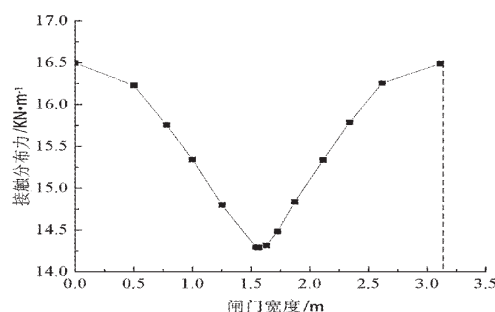


图8 顶水封沿闸门宽度接触分布力图

图9为闸门侧止水在水压和预压缩作用下沿闸门高度的接触力分布。其分布规律与接触应力分布图类似(图7),对该曲线沿横坐标积分可近似计算侧水封总的接触压力,即图9分布力曲线与横纵坐标围成的面积即为总接触压力。经计算,侧水封的总接触压力为129.90 kN。

图10为闸门侧止水在预压缩作用下沿闸门高度的接触压力分布。经计算,侧水封的总接触压力为12.06 kN。同理,可得顶水封的总接触压力为4.42 kN。

经计算,在水压和预压缩作用下,水封与门槽的总接触压力:该值为闸门启闭力计算中的止水摩阻力法向压力值;在预压缩作用下,水封的预压缩量施加给闸门的总反作用力:该值相比于其他荷载所占比重很小,因此在闸门整体有限元计算中可忽略不计。

4 结论

以某高水头深孔平面钢闸门为例,建立了闸门-主轨支承的三维有限元模型和顶(侧)水封-止水座板的二维平面应变模型,研究了不同开度工况下闸门支承约束状态的变化,得到以下结论:

1)在不同开度工况下,定轮(下转第22页)