



人字闸门支枕垫块接触应力分布与磨损分析 *

张明松^{1,2}, 陈梓奇¹, 王恩恒¹, 蔡振宇¹, 张琰彬¹

(1. 三峡大学 机械与动力学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学, 水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为研究人字闸门支枕垫块接触应力分布与接触面磨损情况, 以支枕垫块二维模型为研究对象, 基于经验公式和 Archard 磨损计算通式, 建立支枕垫块接触应力与接触面磨损量计算模型, 利用有限元分析方法获取不同主横梁支反力作用下支枕垫块接触应力大小与分布情况, 以及不同转速、过盈量条件下的接触面磨损量变化分布规律。结果表明: 支枕垫块接触应力大小在初始线接触位置两侧近似呈对称分布, 随着主横梁支反力的增大, 接触应力呈现出递增趋势; 人字闸门的应力主要集中在主横梁轴线上, 并在梁之间急剧减小; 接触面磨损量随着闸门转速和支枕垫块配合过盈量的增加而呈现递增趋势, 最大磨损深度向下游侧偏移。

关键词: 支枕垫块; 接触应力; 磨损分析; 有限元法

中图分类号: U641.3+31; TV663

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)11-0143-05

Contact stress distribution and abrasion of pillow block for miter gate

ZHANG Mingsong^{1,2}, CHEN Ziqi¹, WANG Enheng¹, CAI Zhenyu¹, ZHANG Yanbin¹

(1. College of Mechanical & Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design & Maintenance, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: To study the contact stress distribution and contact surface abrasion of the pillow block for the miter gate, we build the calculation model of the contact stress and contact surface of the pillow block based on the empirical formula and the general formula of Archard abrasion calculation, taking the two-dimensional model of the pillow block as the research object. Then we obtain the magnitude and distribution of contact stress of the pillow block under different support reaction forces of main beams, and the change distribution of contact surface abrasion under different rotational speeds and interference conditions. The results show that the contact stress of the pillow block is approximately symmetrically distributed on both sides of the initial line contact position, and increases with the rising support reaction force of the main beam. The stress of the miter gate is mainly concentrated on the axis of the main beam and decreases sharply among the beams. The abrasion amount of the contact surface rises with the increase in the rotational speed of the gate and the fit interference of the pillow block, and the maximum abrasion depth shifts to the downstream side.

Keywords: pillow block; contact stress; abrasion analysis; finite element method

人字闸门支枕垫块按照结构布置方式可以分为连续式支枕垫块和分段式支枕垫块^[1]。连续式支枕垫块受力均匀、结构紧凑, 多用于超大型或大型人字闸门, 但是 Eick 等^[2]的建模分析指出支

枕垫块不提供均匀的压力分布。分段式支枕垫块结构简单、数量少且易维护, 多用于中型或小型人字闸门, Eick 等^[3]还通过研究指出随着分段式支枕垫块长度增加, 其应力分布将趋近于连续式

收稿日期: 2023-02-08

*基金项目: 水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室开放基金(2017KJX01)

作者简介: 张明松 (1965—), 男, 教授, 从事摩擦磨损、机电一体化技术、特种设备研究。

支枕垫块的应力分布，并且分段式支枕垫块相较于连续式支枕垫块可以更有效地分散应力。人字闸门正常运行时，闸门端部的支枕垫块不存在力矩，整个荷载作为轴向压力传递到闸墩上，较高的压力以及恶劣的环境都会加速支枕垫块的磨损与变形，从而导致人字闸门运行时出现挤卡和振动的情况^[4-5]。Yang 等^[6]指出闸壁与人字闸门之间的缝隙发展是人字闸门失效形式之一，该缝隙是由于门轴柱支枕垫块磨损造成的；Hoskere 等^[7]提出一种支枕垫块缝隙非线性接触仿真分析模型监测支枕垫块缝隙对人字闸门损伤的敏感性。支枕垫块受到磨损所产生的间隙会使闸门所受的荷载重新分布，导致其他区域的荷载增大。

本文针对支枕垫块的接触应力分布与磨损情况进行分析，采用经验公式和 Archard 模型，通过有限元法进行仿真计算，比较不同主横梁支反力作用下支枕垫块接触应力大小与分布，研究接触面磨损量与人字闸门转速、支枕垫块配合过盈量的关系，以及磨损深度的分布情况。

1 理论分析

1.1 接触应力计算

支枕垫块端部通常为平面，以便于将荷载均匀地传递至闸壁上，其中支垫块接触面为圆柱凸面，枕垫块接触面为圆柱凹面，二者之间采用线接触的方式，有助于闸门摆动。支枕垫块截面的几何形状如图 1 所示，其中左侧为枕垫块，右侧为支垫块。

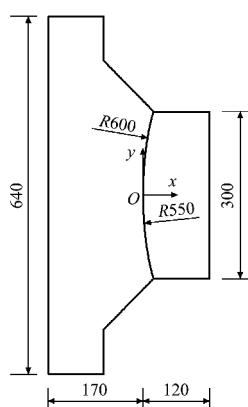


图 1 支枕垫块横截面 (单位: mm)

支枕垫块之间接触应力的计算公式为：

$$\sigma = 0.418 \sqrt{\frac{FE}{l} \cdot \frac{R_2 - R_1}{R_1 R_2}} \quad (1)$$

式中： σ 为支枕垫块之间接触应力，Pa； F 为主横梁支反力，N； E 为弹性模量，Pa； R_1 为支垫块半径，m； R_2 为枕垫块半径，m； l 为人字闸门支枕垫块长度，m。

某人字闸门有效尺寸为 37 m×20.2 m×3.2 m (高×宽×厚)，假设闸门承受极端静水荷载，即上游水位为人字闸门高度的 85%，下游水位为人字闸门高度的 15%，则各主横梁所受支反力分布如图 2 所示，横坐标序号表示从下至上不同位置的主横梁，其中最大支反力为 8.49 MN。

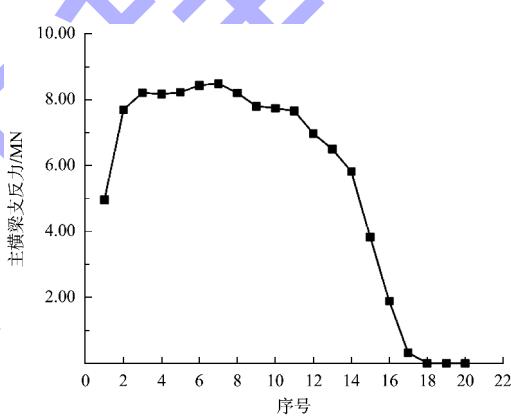


图 2 主横梁支反力分布

1.2 磨损计算

取人字闸门支枕垫块截面作为二维模型，采用 Archard 滑动磨损模型进行支枕垫块接触面上的磨损分析，接触节点的磨损率计算公式为：

$$\dot{w} = \frac{K}{H} p^m v_{\text{rel}}^n \quad (2)$$

式中： \dot{w} 为磨损率； K 为磨损系数； H 为磨损面材料的布氏硬度，MPa； p 为接触点压应力，MPa； v_{rel} 为相对滑动速度，m/s； m 为压力指数； n 为速度指数。压力指数 m 和速度指数 n 的取值直接影响计算精度，取值范围目前并未有明确规定。

2 有限元计算

2.1 模型建立与网格划分

人字闸门支枕垫块的模型一般取单位长度，

即可将模型简化为二维模型, 根据图 1 的支枕垫块几何截面, 在 ANSYS Workbench 中建立人字闸门支枕垫块的二维分析模型。支枕垫块材料采用 06Cr19Ni10 不锈钢, 相关参数见表 1, 根据表中

数据对支枕垫块采用所有三角形法进行网格划分, 并对支垫块与枕垫块的接触表面进行加密处理, 以提高仿真分析的准确性。划分网格后产生 33 509 个节点和 16 333 个单元, 见图 3。

表 1 支枕垫块材料性能指标

弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	切变模量/GPa	磨损系数	布氏硬度/MPa	速度指数	压力指数
193	0.31	210	1.8	3×10^{-8}	201	0.8	1.3



图 3 支枕垫块网格划分

2.2 边界条件与接触设置

在二维模型支垫块端部施加垂直于端部的力 $F=8.49 \text{ MN}$, 同时施加远程位移约束, 闸墙槽上的枕垫块取固定支撑约束。定义支垫块为接触几何体, 枕垫块为目标几何体, 接触面取摩擦接触,

摩擦系数取 0.2, 接触算法选用广义的拉格朗日算法。

2.3 有限元仿真结果

根据建立的二维分析模型, 仿真得到支枕垫块的等效应力见图 4, 接触面的接触应力如图 5 所示。

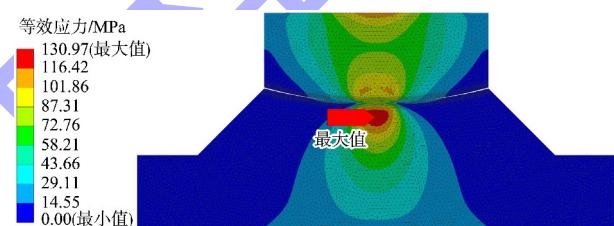


图 4 支枕垫块等效应力分析结果

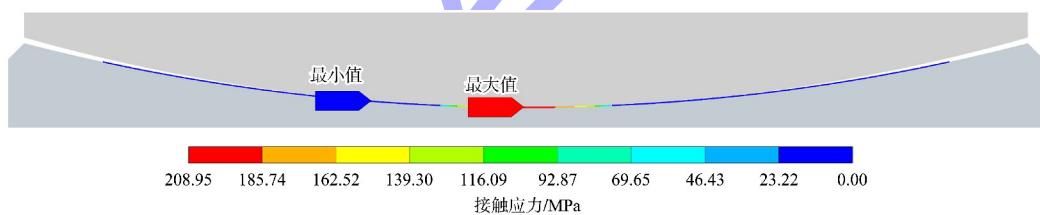


图 5 支枕垫块接触面接触应力分析结果

3 结果分析

3.1 人字闸门支枕垫块接触应力分布

由有限元计算结果可知, 最大等效应力出现在人字闸门枕垫块的次表层, 且明显大于接触面上的等效应力, 这意味着枕垫块相较于支垫块在磨损时的损伤会更严重。

支枕垫块接触应力的有限元解与理论解见图 6。可以看出, 二者误差很小, 这说明了有限元仿真的可靠性。同时, 从曲线上可以看出支枕垫块间的接触应力随主横梁支反力的增大而增大, 但接触应力的增加逐渐变缓, 这是由于在初始状态下, 支垫块与枕垫块之间是线接触的方式, 随着人字

闸门端部支垫块所受荷载逐渐增大, 线接触方式开始变为面接触, 且二者之间接触面积逐渐增大, 因此支枕垫块接触应力增速逐渐趋于平缓。

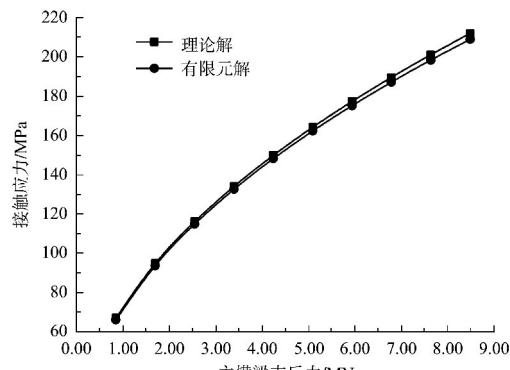


图 6 支枕垫块接触应力理论解与有限元解曲线

通过在支垫块底部施加不同主横梁支反力 F 、 $1.1F$ 、 $1.2F$ 、 $1.3F$ 、 $1.4F$ 、 $1.5F$ ，得到的接触应力分布情况见图 7。可以看出，最大接触应力在序号为 0 的位置，大小分布关于该位置近似是对称的，且在短距离内迅速降低至 0 MPa。

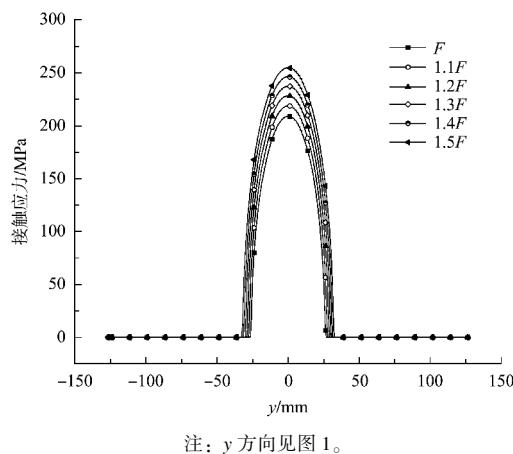


图 7 枕垫块接触应力大小分布

人字闸门支枕垫块单位长度下接触面积随力的变化曲线见图 8。可以看出，支枕垫块接触面积随力的增大不断增大，但是其增长速率不断减小，这是因为支枕垫块仍处于弹性变形阶段。

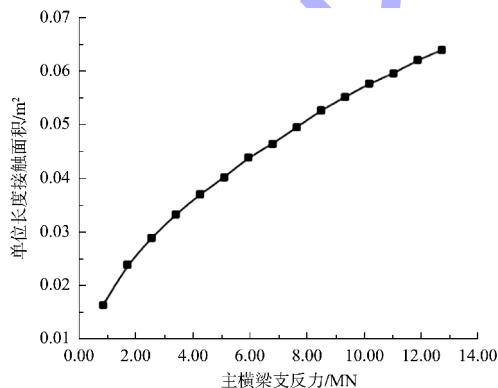


图 8 支枕垫块单位长度接触面积变化曲线

因此，随着主横梁支反力的增加，支枕垫块接触应力不断增大，接触面积也不断增大，由于磨损量与接触应力成正比，导致支枕垫块接触表面的磨损速率增加，同时磨损区域也扩大。

人字闸门支枕垫块所受等效应力随闸门高度变化关系见图 9，其中虚线为主横梁轴线。可以看出，各部分支枕垫块的应力分布并不均匀，由于闸门上的负载主要是通过横梁传递到门轴柱支枕垫块，大部分的应力集中在主横梁轴线上，并在梁之间急剧减小，这意味着主横梁附近的支枕垫块磨损速率要快于其他部分。人字闸门底部到中部的支枕垫块应力分布均匀，到达 15 m 以上时开始逐渐减小，由此可以得出，人字闸门下半部分的支枕垫块较之上半部分更容易磨损，这会导致上半部分支枕垫块紧密接触止水时，下半部分支枕垫块因射流现象加速支枕垫块表面的损伤。

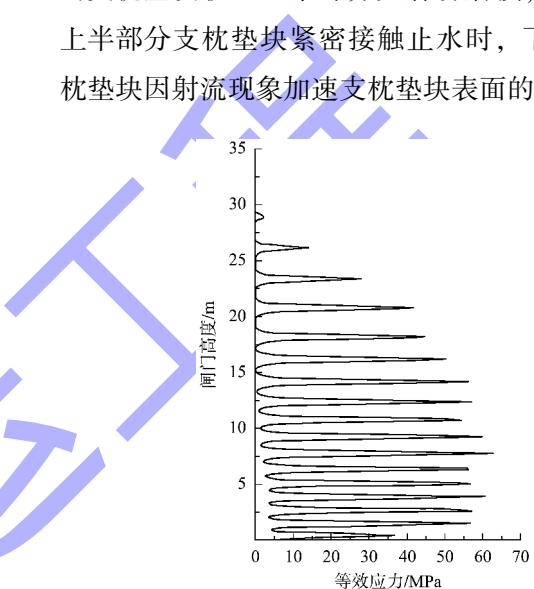


图 9 不同闸门高度处支枕垫块等效应力分布

3.2 人字闸门支枕垫块磨损分析

通过改变人字闸门开启时的转速分析其转速对支枕垫块磨损的影响，分别进行了 0.025 、 0.050 、 0.075 、 0.100 和 0.125 ($^\circ$)/s 的支枕垫块运动仿真，得到了不同转速下支枕垫块的体积损耗，见图 10。可以看出，当转速增大时，体积损耗也逐渐增大，这是因为支垫块与枕垫块之间的相对速度随着转速的增加而增大，所以转速越高，支枕垫块的磨损率越大，在相同磨损时间下磨损量也就越大。因此，在实际人字闸门开启过程中，应先慢速运行至支枕垫块间完全分离以减小其相对滑动造成的磨损。

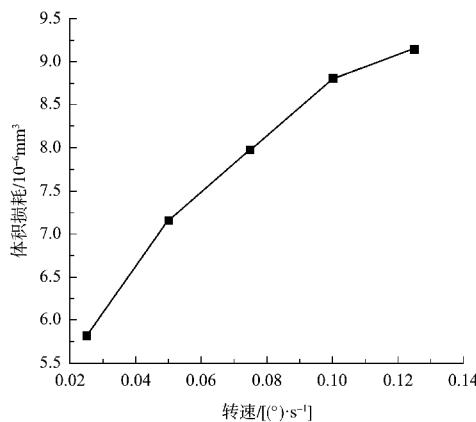


图 10 磨损体积随转速变化曲线

将支枕垫块配合过盈量分别设置为 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 mm, 分析不同过盈量对支枕垫块磨损的影响, 5 组过盈量与磨损体积损耗量的变化曲线见图 11。可以看出, 在 F 外荷载作用下, 磨损体积随过盈量的增加不断增大, 这是因为增大过盈量会导致接触表面应力的增大, 在磨损时间与相对滑移速度一定时, 磨损率增大, 磨损量也就越大。

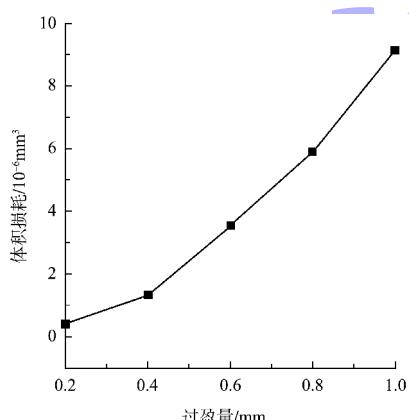


图 11 磨损体积随过盈量变化曲线

不同过盈量下支枕垫块接触表面磨损深度与位置的关系见图 12。可以看出, 最大磨损深度位置并非支枕垫块初始线接触处, 而是向下游侧偏移, 且随着过盈量的增大, 最大磨损深度位置向下游侧偏移越大。

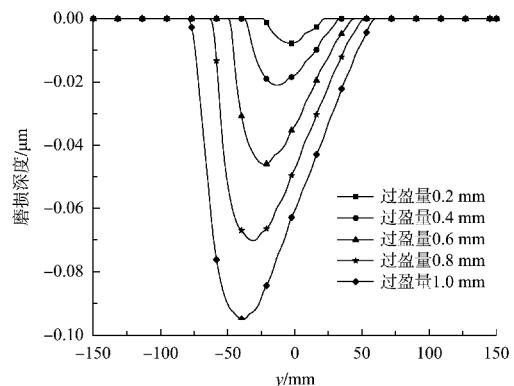


图 12 不同过盈量下磨损深度与位置的关系

4 结论

- 1) 最大等效应力出现在枕垫块的次表层, 且远大于支垫块内部与接触面, 因此枕垫块相较于支垫块更容易产生损伤。
- 2) 主横梁支反力对支枕垫块的接触性能有着重要影响。接触应力随主横梁支反力的增加而增大; 单位长度接触面积随主横梁支反力的增加而增大, 增速逐渐变缓。
- 3) 人字闸门大部分的应力集中在主横梁轴线上, 并在梁之间急剧减小, 导致主横梁轴线上的支枕垫块磨损相较于其他区域更严重。
- 4) 相同磨损时间下, 支枕垫块的磨损量与人字闸门开启转速、支枕垫块间过盈量呈正相关; 最大磨损深度向下游侧偏移。

参考文献:

- [1] 彭智祥. 人字闸门支枕垫块及中侧止水结构研究 [J]. 水力发电, 2005(3): 67-69.
- [2] EICK B A, TREECE Z R, SPENCER B F, et al. Automated damage detection in miter gates of navigation locks [J]. Structural control and health monitoring, 2018, 25(1): e2053.
- [3] Eick B A, Smith M D, Fillmore T B. Feasibility of retrofitting existing miter-type lock gates with discontinuous bolster blocks [J]. Journal of structural integrity and maintenance, 2019, 4(4): 179-194.

(下转第 203 页)