



三峡升船机对接密封框 C 形止水压板 加固工装与检修平台设计*

汤伟毕¹, 路明明², 闫晓青¹

(1. 长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443000;

2. 中国船舶重工集团武汉船舶工业有限公司, 湖北 武汉 430022)

摘要: 为了解决三峡升船机对接密封框 C 形止水压板连接螺栓出现断裂及止水检修维护不便的问题, 建立 C 形止水压板及连接螺栓在不同运行工况下的力学模型, 根据对螺栓强度的校核分析结果可知, 泄间隙水过程中, C 形止水压板连接螺栓所受拉应力大于材料的许用拉应力。根据分析结果并结合现场设备的结构布置特点进行 C 形止水压板加固工装的设计, 经安装使用验证螺栓受力满足设计要求, 同时设计 1 套 C 形止水检修平台, 满足快速检修更换需求, 解决了实际工程问题。

关键词: 三峡升船机; 对接密封框; C 形止水; 工装设计; 检修平台

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0152-05

Design of reinforcement tooling and maintenance platform for C-shaped sealing plate in butt sealing device of Three Gorges ship lift

TANG Wei-bi¹, LU Ming-ming², YAN Xiao-qing¹

(1. Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443000, China;

2. Wuhan Shipbuilding Industry Co., Ltd., China Shipbuilding Industry Corporation, Wuhan 430022, China)

Abstract: The C-shaped sealing plate in the butt sealing device of the Three Gorges ship lift is prone to fractures, and its sealing maintenance is inconvenient. Hence, this study builds the mechanical models of the C-shaped sealing plate and connecting bolts in different operating conditions. The analysis of the bolt strength check shows that the tensile stress on the connecting bolts of the C-shaped sealing plate is greater than the tensile stress limit of the material in the process of discharging interstitial water. According to the analysis results and the structural characteristics of the field equipment, we design the reinforcement tooling of the C-shaped sealing plate, and the installation and application verify that the stress on the bolt can meet the design requirements. Meanwhile, we design a C-shaped sealing maintenance platform to satisfy the requirements of rapid maintenance and replacement, which solves practical engineering problems.

Keywords: Three Gorges ship lift; butt sealing device; C-shaped sealing; tooling design; maintenance platform

三峡升船机作为船舶通过三峡枢纽的快速过坝通道, 对提高三峡枢纽通航过坝能力具有重要意义^[1]。三峡升船机由上下游引航道、上下闸首和船厢室段等组成, 对接密封装置位于船厢室段, 用于连通航道与船厢水域, 主要由 U 形框架及其

导向支承滑块、驱动油缸、碟形弹簧组及 C 形止水等组成, 其结构见图 1。U 形框架的端部装设 C 形止水及垫块, U 形框架外侧与船厢结构之间由 C 形止水密封, 间隙充水后作用在 C 形止水上, 增加了密

收稿日期: 2022-04-18

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402007)

作者简介: 汤伟毕(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为升船机机械结构。

封的可靠性^[2]。国内外升船机对接密封装置底部和端面分别安装止水进行密封, 止水通过压板及连接螺栓固定, 对接密封装置主要通过驱动油缸和保压装置进行对接和保压, 其对接密封结构形式与三峡升船机类似^[3-5]。

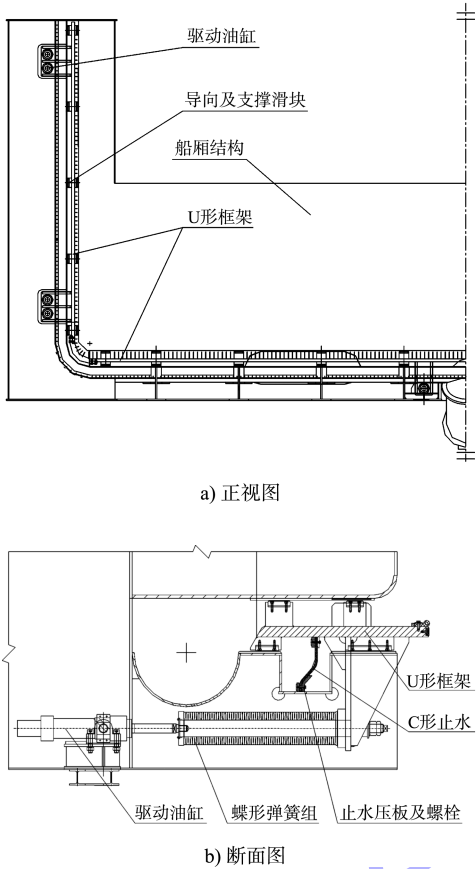


图 1 船厢对接密封装置结构

升船机船厢与上、下游航道对接或解除对接时, 需在对接密封框内进行充、泄水操作, 充泄间隙水时水流冲击能量较大, C 形止水及压板螺栓受力工况复杂。在三峡升船机运行过程中出现了压板固定螺栓断裂情况, 部分螺栓出现不同程度拉长, 断螺栓取出及更换困难, 存在安全隐患且影响通航, 而 C 形橡胶止水件易损件, 当出现破损或达到使用年限时需及时更换^[6-7]。前期检修更换 C 形止水及螺栓时需搭设临时施工脚手架, 止水试验漏水严重时还需进行重复施工, 脚手架搭设和拆除占用大量检修时间, 且存在安全隐患。目前, 学者们对不同使用工况下的螺栓进行了受力分析及强度校核, 并针对船闸人字门检修专用

工装进行研究^[8-10], 但缺乏针对三峡升船机 C 形止水及压板螺栓的受力分析和配套检修平台的设计研究。

本文基于工程实际需求, 针对 C 形止水压板螺栓存在断裂及检修维保不便的问题, 对 C 形止水压板及螺栓在不同工况下的受力进行分析, 根据分析结果提出改进措施, 为提高 C 形止水检修效率, 设计并制作安装了 1 套快速检修平台, 满足日常设备维护及快速检修更换的需要。

1 C 形止水及压板受力分析

1.1 泄水流量及流速计算

原泄间隙水工艺中, 首先通过水泵将间隙水抽至间隙水管, 当间隙水深由 9.8 m 降至 5.5 m 后停泵, 再通过自流方式将剩余水体泄至间隙水管; 为缩短泄水时间, 将间隙水全部通过自流方式泄至间隙水管, 泄水方式的改变导致 C 形止水及压板受力工况随之变化, 从而出现连接螺栓断裂情况, 对 C 形止水及压板受力进行了复核计算。

船厢对接密封框中的水通过自流的方式进入到船厢底部的充泄水管道中, 水在自然流态状态下的流量 Q 及流速 v 的计算公式为^[11]:

$$\begin{cases} v=Q/A \\ Q=\sqrt{H/SL_g} \\ S=10.3n^2/D^{5.33} \\ A=\pi D^2/4 \end{cases} \quad (1)$$

式中: D 为管道内径; H 为最大水头差; S 为管道的比摩阻; L_g 为管道总长; n 为管道糙率; A 为管道截面积。已知 $H=9.8$ m, $D=0.996$ m, $L_g=130$ m, $n=0.012$, 计算得 $v=9$ m/s, $Q=7.05$ m³/s。

1.2 静水压强计算

间隙充水状态下, C 形止水及压板受力分析见图 2, C 形止水所受静水压强 P 为:

$$P=\rho gh \quad (2)$$

式中: ρ 为水的密度, 取 1.0 t/m³; g 为重力加速度, 取 9.8 m/s²。

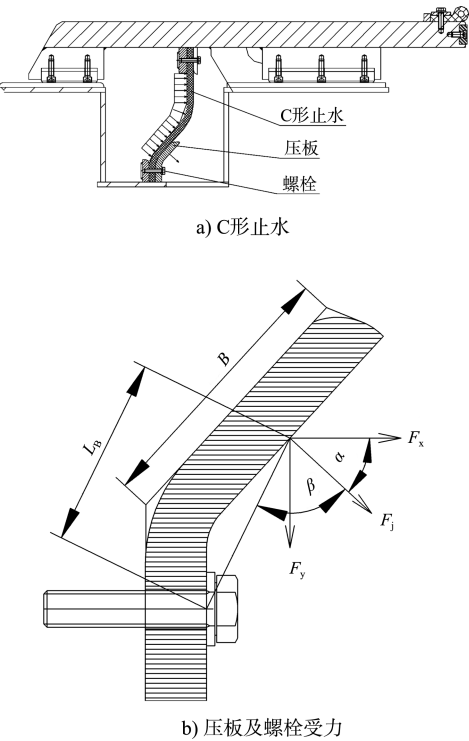


图 2 C 形止水及压板受力分布

根据计算，压板静水压强 $P=96\text{ kPa}$ 。止水压板的受压宽度 $B=93.5\text{ mm}$ ，受压长度 $L_Y=1.995\text{ m}$ ，则压板的总受力 F_j 为：

$$F_j = PBL_Y \tag{3}$$

根据计算，压力 $F_j=1.7907\text{ kN}$ ，则螺栓受力情况为：

$$\begin{cases} F_x = F_j \cos\alpha / N \\ M = F_j L_b \sin\beta / N \end{cases} \tag{4}$$

式中： F_x 为单颗螺栓所受压力； α 为 F_j 与竖直方向的夹角， $\alpha=43^\circ$ ； β 为 F_j 与螺栓受力点力臂之间的夹角， $\beta=73.5^\circ$ ； L_b 为 F_j 对螺栓根部产生的力臂， $L_b=62.2\text{ mm}$ ； M 为单颗螺栓所受弯矩； N 为螺栓数量， $N=20$ 。根据计算，单根螺栓受拉力和弯矩分别为： $F_x=654.8\text{ N}$ ， $M=53.4\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

1.3 射流冲击力计算

对接密封框内存储满间隙水时，相对船厢底部的充泄水管道的头差为 9.8 m ，当船厢解除对接需泄间隙水时，泄水管道蝶阀打开，间隙水通过自流方式在短时间内泄入管道中，末段水流在管道口附近冲击作用于 C 形止水时产生射流冲击力 F_{SZ} ：

$$F_{SZ} = \delta \rho Q v \sin\alpha \tag{5}$$

式中： δ 为冲击系数，取 1.25 。经计算， $F_{SZ}=54.091\text{ kN}$ ，射流有效面积作用范围为长度 $L_Y=1.995\text{ m}$ 的压板，该面积内有 20 颗螺栓，单个螺栓所受射流冲击力 $F_s=2.705\text{ kN}$ 。

1.4 螺栓预紧力计算

根据螺栓的受力工况可知，螺栓所受的总拉力为残余预紧力和静压力或动水冲击力的总和，单颗螺栓所受静压力 $F_x=654.8\text{ N}$ 小于冲击力 $F_s=2.705\text{ kN}$ ，则螺栓所受最大拉力为冲击力 F_s 。为保证 C 形止水安装完成后不漏水，需对压板螺栓进行预紧，保证 C 形止水处于压缩密封状态，机械设计手册建议的残余预紧力 F_p 计算公式为：

$$F_p = K F_s \tag{6}$$

式中： K 为残余预紧力系数，取 $K=1.5$ 。则螺栓所受的总拉力 $F_z=F_p+F_s=6.762\text{ kN}$ 。

1.5 螺栓强度校核

实际安装过程中，螺栓止水压板下端与升船机底部安装面板接触，且由于对螺栓施加了预紧力，使螺栓本身在弯矩 M 的作用下并不受剪切力，只需对螺栓进行拉应力强度校核。止水压板螺栓性能参数为：公称直径 M12；规格型号 A2-70；抗拉强度 700 MPa ；屈服强度 450 MPa ；疲劳极限 224 MPa 。

螺杆所受最大拉应力见式(7)：

$$\begin{cases} \sigma = \frac{1.3 F_z}{A_s} \\ [\sigma] = \frac{\sigma_s}{S_s} \end{cases} \tag{7}$$

式中： σ 为最大拉应力； $[\sigma]$ 为许用应力； A_s 为螺栓的公称应力截面积，为 84.3 mm^2 ； σ_s 为材料的屈服强度，为 450 MPa ； S_s 为变载荷安全系数，取为 8 。经计算， $\sigma=104\text{ MPa}$ ， $[\sigma]=56\text{ MPa}$ ，最大拉应力大于许用应力。

1.6 螺孔螺纹抗挤压强度校核

螺孔的基材为 Q345，许用挤压应力 $[\sigma]=230\text{ MPa}$ ，其强度小于螺栓的强度，故校核孔的螺纹挤压应力 σ_p 计算公式为：

$$\sigma_p=\frac{F_z}{\pi D_2hz}$$

(8)

式中： D_2 为螺纹中径，为 10.86 mm； h 为螺纹高度，普通螺纹 $h=0.541p$ ，螺距 $p=1.75$ mm； z 为螺纹结合圈数， $z=12/1.75=6.8$ 近似 7 圈，一般螺纹前 3 圈承担了 70% 的螺栓载荷，故取 $z=4$ ，计算得： $(\sigma_p=52\text{ MPa})\leq([\sigma]=230\text{ MPa})$ ，螺孔抗挤压强度满足设计要求。

综上受力分析可知：在泄间隙水的过程中，导致螺栓易断裂的主要原因是 C 形止水压板螺栓所受拉应力大于材料的许用拉应力。

2 C 形止水压板加固工装设计

为减小泄间隙水过程中对密封框 C 形止水压板及螺栓的冲击力，在止水压板背面安装加固工装，固定在厢头底部纵梁及底板上，整体安装布置见图 3。

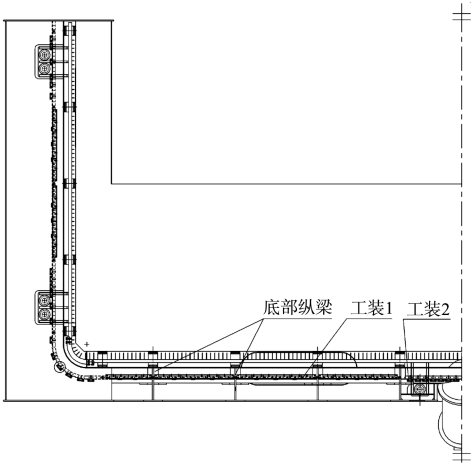


图 3 工装总布置

图 3 中压板加固工装由工装 1、2 组合在对接密封框压板上，其中工装 1 布置在对接密封框水平和竖直段，工装 2 布置在对接密封框圆弧过渡段及部分水平、竖直安装空间狭窄段。不同长度规格的工装 1 分别与纵梁的间距相匹配，工装的两侧固定安装在底部纵梁的端面板上，两个工作面的夹角与压板角度保持一致，每个工作面分别交替均布一排顶紧螺栓，螺栓轴向与压板垂直，见图 4。工装 2 由底座和压块组成，其中底座焊接

在厢头底板上，压块底部通过螺栓固定在底座上，见图 5。

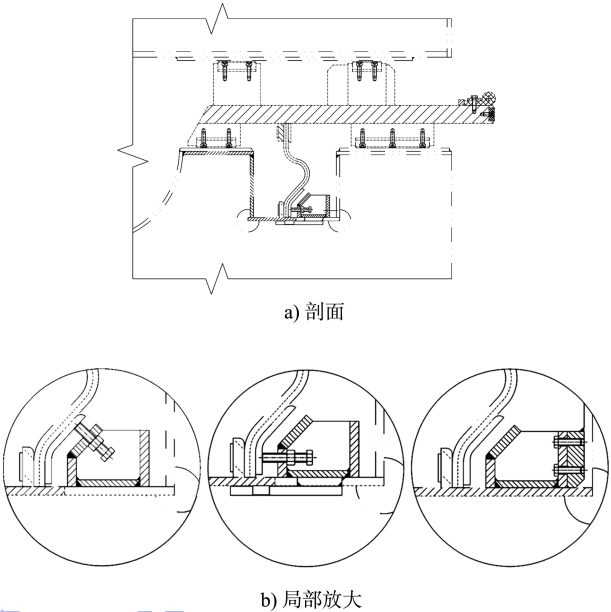


图 4 加固工装 1 结构及布置

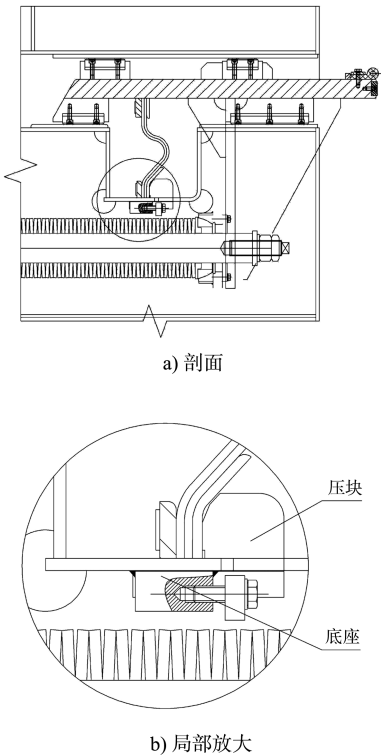


图 5 加固工装 2 结构及布置

两种结构形式的压板工装根据对接密封框 C 形止水安装布置特点设计，实施现场安装后，止水压板及螺栓受力情况满足设计要求，螺栓断裂现象得到解决。

3 C形止水检修平台设计

3.1 水平段检修平台

水平段固定平台安装在船厢厢头底部，位于C形止水橡皮的正下方，平台上通过反向行走轮组和托轮组滑动支撑活动平台。反向行走轮组固定在活动平台的端头位置，并与固定平台构成滑动配合；托轮组固定在活动平台的底端，并滑动支撑在固定平台的顶部；固定平台和活动平台之间设置有插销锁紧机构，见图6。

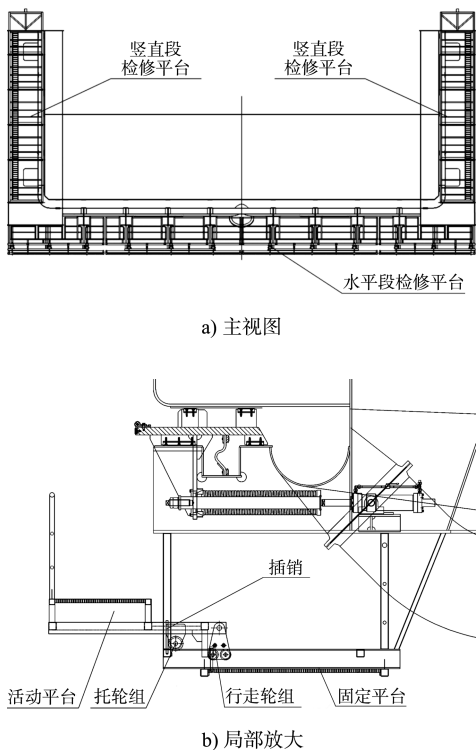


图6 C形止水检修平台结构及布置

平台框架顶部固定有多根导轨用于滑动支撑，其中导轨的一侧固定有多根竖直布置的吊杆。反向行走轮组通过连接轴铰接在活动平台的大梁上，用于支撑平台自重，防止平台倾翻。当进行对接密封C形止水的日常维护及设备巡视时，作业人员从升船机通道到达固定平台上进行作业；当进行C形止水更换及检修时，作业人员到达固定平台后，拔起安全插销，手动将活动平台整体推出至工作位后插上安全插销，将活动平台和固定平台相对固定，即可进行相关维护工作，施工完成后反向操作，活动平台可缩回至升船机厢头结构下方，不影响升船机通航运行，该平台可大幅缩

短C形止水检修时间。

3.2 竖直段检修平台

竖直段检修平台位于厢头两侧的对接密封框C形止水位置，平台为多层分段拼接可拆卸的活动式结构，平台外侧布置有防护栏杆，平台之间通过直爬梯相通。平台顶部水平伸出一端固定梁，梁上加工有安装孔，布置在船厢厢头甲板上固定的耳板与固定梁通过插销连接。

施工作业时通过起吊设备将2组竖直段检修平台分别吊装至厢头端C形止水位置，检修平台通过厢头端面与甲板垂直面进行定位后固定，作业人员从厢头零层甲板进入检修平台并通过直爬梯进入到不同层的平台上进行施工作业，检修施工完成后，拆除固定梁上的插销并通过起吊设备2组竖直段检修平台吊出。该竖直平台的结构形式及安装方法可降低工作强度，节省工作平台搭建时间，缩短检修工期及停航时间。

4 结论

1)对C形止水压板及螺栓进行理论受力分析，得出现有螺栓所受最大拉应力大于许用应力值，不满足复杂工况下强度要求，基于分析结果设计止水压板加固工装并进行现场安装试验，螺栓的受力工况得到明显改善。

2)设计并制作安装的C形止水检修平台可满足日常设备巡视和检修维护需求，且便于操作，可大幅缩短检修维护时间，保障检修的安全可靠性。

参考文献：

[1] 钮新强.三峡升船机结构关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.

[2] 杨林江,路卫兵. 三峡升船机概述[J]. 水电与新能源, 2017(1): 7-14.

[3] 马仁超,王处军,曹以南,等. 景洪水力式升船机机械系统设计[J]. 水运工程, 2017(10): 42-47.

[4] 姚明明,叶子靖. 向家坝升船机对接密封装置运行可靠性浅析[J]. 中国水运, 2020(9): 113-115.