

万家寨水电站机组主轴工作密封失效原因分析及改造

张腾飞 葛正宇 刘志刚

黄河万家寨水利枢纽有限公司万家寨水电站 山西 忻州 036412

摘要: 水轮发电机组流道内压力水沿着主轴与固定部件之间的间隙经主轴工作密封进入顶盖,当主轴工作密封失效,顶盖排水系统排水能力小于主轴工作密封漏水量时,顶盖水位上涨,机组只能保护停机。近年来,万家寨水电站1-4#机组主轴工作密封频繁失效,多次导致机组被迫停机转检修,1-3#机组做为蒙西电网的重要调峰机组,频繁非计划停运给蒙西电网调峰调频造成很大影响。通过总结万家寨水电站1-4#机组橡胶活塞式主轴工作密封检修维护存在的问题,分析失效原因,通过计算校核改造所需把合螺栓安装机械强度,进而对主轴工作密封进行改造,保障其能在一个大修周期内免维护。改造后的主轴工作密封经时间验证,其工作可靠稳定,总结分析其优点,方便同行借鉴。

关键词: 主轴工作密封; 橡胶活塞; 机械强度; 免维护

前言

万家寨水电站1-4#水轮发电机组由天津通用水电设备有限公司设计、制造,机组主轴工作密封采用水压调整橡胶活塞式端面密封结构。主轴工作密封自2013年后,失效次数逐年增加,主轴工作密封检修越来越频繁,低水头多泥沙运行期间甚至不能保证稳定运行一个小修周期,这不仅给检修人员和渗漏排水系统带来负担,而且难以适应当前形势下电网对发电企业设备可靠性的要求。在以往的主轴工作密封检修维护过程中,查找水压调整橡胶活塞式端面主轴工作密封存在问题,分析其失效原因,结合已有主轴密封形式,对万家寨1-4#机组主轴工作密封完成改造。

1 橡胶活塞式主轴工作密封工作原理及存在问题

1.1 工作原理

万家寨水电站1-4#机组主轴工作密封采用水压调整橡胶活塞式端面密封结构,主要由抗磨板、橡胶活塞、外环、内环、导向杆等组成(见图1)。橡胶活塞为丁苯橡胶材料,压力水通入橡胶活塞上腔,经活塞上的进水孔进入橡胶活塞下端面,在抗磨板与橡胶活塞下端面之间形成水膜,在压力和离心力的作用下,水膜的水从橡胶活塞与抗磨板之间的密封面两侧流出,带走摩擦产生的热量的同时,起到润滑作用,在橡胶活塞上腔压力水的作用下将橡胶活塞压贴在抗磨板上,起到密封作用,橡胶活塞下端面在磨损后能自动补偿。

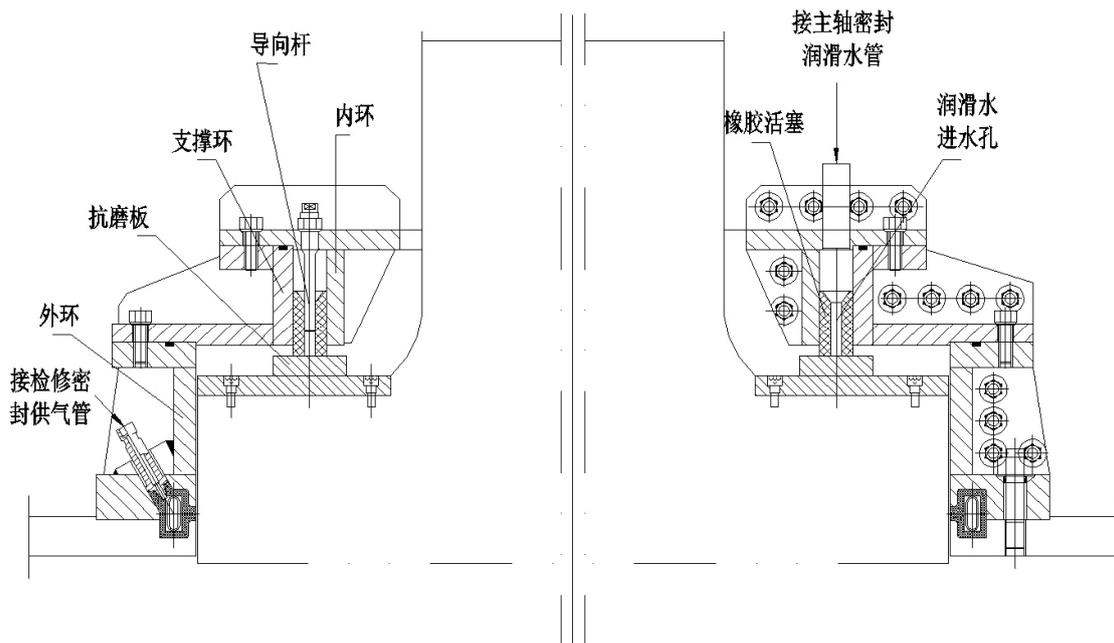


图1 主轴密封结构图

1.2 存在问题

1.2.1 主轴工作密封故障率高且呈上升趋势，严重影响机组的安全运行。故障主要表现在橡胶活塞磨损或粘接口脱开，导致主轴密封漏水量过大，超过顶盖排水系统排水能力，有时增装顶盖临时排水泵进行排水还能勉强维持机组正常运行，当橡胶活塞发生严重磨损时，主轴工作密封失效，漏水量激增，造成机组的非计划停运，必须对主轴工作密封进行检修更换橡胶活塞，2016年-2020年1-4#机组主轴工作密封检修次数统计见流量图2。

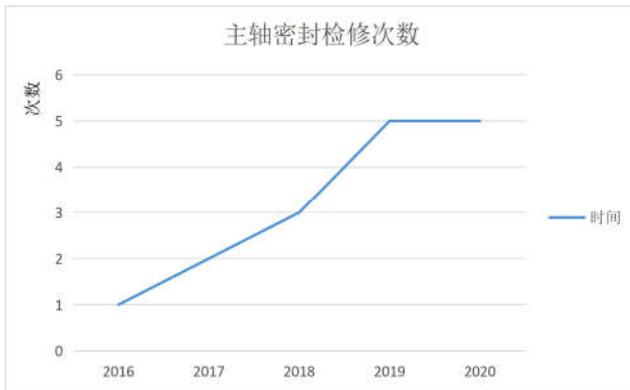


图2 2016年-2020年1-4#机组主轴工作密封检修次数统计表

1.2.2 影响其它设备正常运行。主轴密封漏水量过大，在汛期时，水中泥沙含量增大，流经顶盖时，泥沙在顶盖上沉淀淤积，顶盖排水泵周围被泥沙淤堵不能正常排水，有时甚至造成烧泵。流经排水廊道进入集水井排时，在排水廊道和集水井内沉淀淤积（见图3），大流量的渗漏含沙水，增加排水泵启停次数的同时，又加速

了排水泵橡胶轴承磨损，最终增加排水泵检修频次。



图3 排水廊道、集水井泥沙淤积

1.2.3 主轴工作密封检修难度大。因主轴工作密封位于顶盖上方，水导油槽下方，周围还布置有水导油槽冷却器和油水管路，致使检修工作空间狭小，再加结构部件较重、搬运不便，使检修难度大大增加。

2 失效原因分析

2.1 只能局部形成水膜

万家寨水电站1-4#机组主轴工作密封橡胶活塞沿圆周方向均布4个进水孔，橡胶活塞上腔通入压力水，压力水沿进水孔进入橡胶活塞下端面，从进水孔周围的橡胶活塞与抗磨板之间流走，在进水孔下端面局部形成较厚水膜，然而，由于橡胶活塞无刚性，形成水膜部位不能带动其它部位整体上浮，未设置进水孔的部位，橡胶活塞只受上腔水压力，水压力作用下橡胶活塞紧贴抗磨板（见图4），最终导致难以在橡胶活塞下端形成整体水膜。

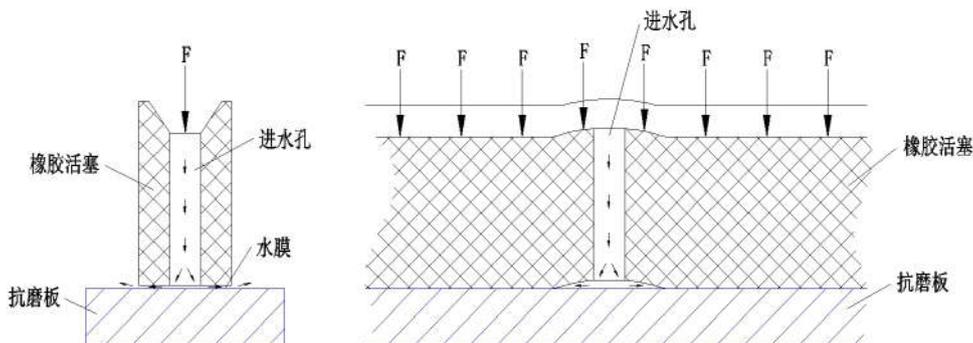


图4 橡胶活塞与抗磨板位置图

2.2 橡胶活塞不能正常浮动、易开裂

橡胶活塞更换时，难度大，导致橡胶活塞不能正常浮动。橡胶活塞长度难以控制，橡胶活塞需先放支撑环

内测，贴紧支撑环内测后在切割部位做标记，还需根据经验预留出打磨损耗部分长度后再切割，导致橡胶活塞切割后长度误差较大，橡胶活塞切割过长，粘接后橡胶活塞挤压支撑环内测，橡胶活塞切割过短，粘接后橡胶活塞紧贴内环外侧，加之支撑环内测和内环外侧表面存在锈蚀情况，最终导致橡胶活塞上下移动时摩擦力变

作者简介：张腾飞（1990—），男，陕西人，学士，工程师，从事水电站机械设备检修维护方面的工作。E-mail: 617068996@qq.com

大，橡胶活塞难以浮动。

橡胶活塞切口粘接质量难以保障，易开裂。手工切割后粘接面平整度差，粘接前手工打毛粘接面，由于现场空间狭小，人员很难给予粘接面施加持续挤压力，最终导致接触有效面积较小，机组运行时橡胶活塞粘接口开裂。

2.3 橡胶活塞耐磨性能低

橡胶活塞材质过软，橡胶活塞与抗磨板相对运动时摩擦力大，摩擦力大不仅加速橡胶活塞磨损，而且使橡胶活塞导向杆受力过大，导向杆弯曲变形（见图5），弯曲导向杆给密封条施加压力，最终导致橡胶活塞局部磨损严重。



图5 导向杆弯曲

起初橡胶活塞未严重磨损，主轴工作密封还能保持密封效果，随着机组运行时间增长，橡胶活塞产生严重磨损（见图6），最终主轴工作密封失效。



图6 橡胶活塞严重磨损

3 改造

3.1 改造后的结构型式

改造后的万家寨1-4号机组主轴工作密封为水压式端面密封结构型式，主要由密封环、抗磨板、补偿弹簧、浮动环、润滑水管路等组成（见图7），密封环采用cestidur材料，具有良好密封性和耐磨性。工作原理是通过水压力、压缩弹簧力和浮动件的重力联合作用，将轴向力均匀施加在密封环上，并在密封环和抗磨板间通入清洁压力水，形成水封和润滑水膜，保障磨擦面良好的密封效果，且密封环具备自动补偿功能。浮动环上装设指针，用于监视密封环磨损情况。

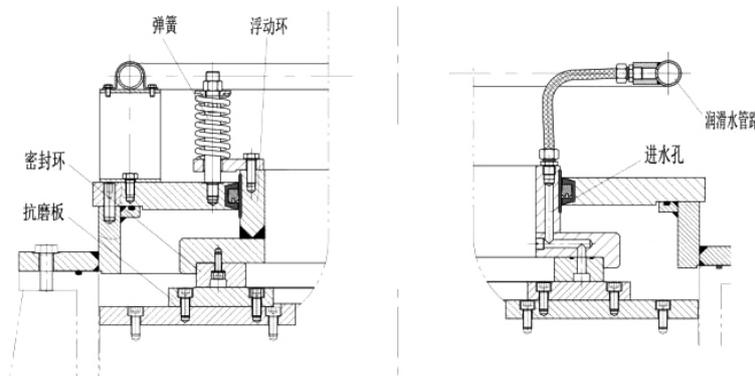


图7 主轴工作密封结构图

3.2 把合螺栓强度校核

因原主轴密封外环和把合螺栓不在改造范围内，支撑环和外环需要配制，需对原来外环和支撑环间布置的60个M24把合螺栓进行检核，支撑环受力见图8。

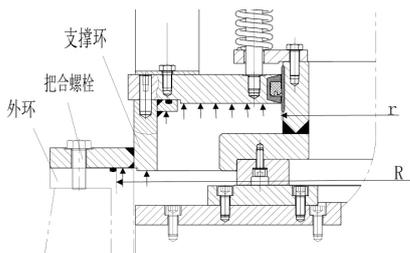


图8 支撑环受力分析

螺栓主要受力：内腔水压力和支撑环重量，润滑水管重量忽略。

螺栓参数：

螺栓数量 $n = 60$

螺栓直径 $M = 24\text{mm}$

螺栓最小直径 $d_{\min} = 20.75\text{mm}$

螺栓许用应力 $[\sigma_1] = \text{uts}/3 = 106.7\text{MPa}$ （4.8级）

螺栓最小截面积 $A_{\min} = d_{\min}^2 \cdot 0.785 = 338.2\text{mm}^2$

密封水腔参数：

内径 $r = 913\text{mm}$

外径 $R = 1205\text{mm}$

水压 $P = 0.65\text{MPa}$

面积 $A_1 = (R^2 - r^2) * 0.785 = 1942936.8\text{mm}^2$

支撑环受到的向上力 $F = P * A_1 = 1262908.9\text{N}$

支撑环重量 $G = 12282.1\text{N}$

单个螺栓受力 $F_1 = (F - G) / n = 20843.78\text{N}$

单个螺栓应力 $\sigma_1 = F_1 / A_{\text{min}} = 61.64\text{MPa}$

螺栓判定 $\sigma_1 < [\sigma_1]$ 合格

通过校核可知,使用原外环把合螺栓孔能满足主轴工作密封改造机械强度要求。

3.3 改造后主轴工作密封运行情况

1-4#机组主轴工作密封相继于2021年完成改造,至2024年3月,主轴工作密封再未出现漏水量变大或密封失效等情况,在此期间,只在机组小修时对密封环磨损量进行检查记录(见表1),3年时间密封条磨损量平均不超过2mm,密封环允许磨损量不超过12mm。2024年初,对1、4#机组主轴密封环磨损量进行拆解检查,1#机组密封环磨损0.9mm,4#机组密封环2.1mm。

表1 1-4#机组主轴工作密封改造后密封环随时间磨损量

| 年份 | 总磨损量(单位: mm) | | | |
|------|--------------|-----|-----|-----|
| | 1# | 2# | 3# | 4# |
| 2021 | 0.5 | 0.9 | 1.2 | 1.8 |
| 2022 | 0.7 | 1.2 | 1.5 | 2.0 |
| 2023 | 0.8 | 1.4 | 1.7 | 2.1 |

3.4 改造后主轴工作密封优点分析

(1)能够形成整体的稳定水膜。改造后的主轴密封采用12根DN15的软管沿进水孔均匀向密封环槽供水,虽然密封环与抗磨板接触面间隙由于加工、安装等原因存在局部偏差,但只要供水流量充足,即可保障密封环槽内水压均匀分布,加之密封环固定在刚性浮动环上,最

终密封环整体向上浮起,形成稳定水膜。

(2)密封环磨损可在弹簧作用下自补偿。浮动环上安装有12根处于压缩状态的弹簧,当密封环产生磨损后,在弹簧的压力下,可使密封环与抗磨板相对距离不发生较大变化。浮动环上装设指针和限位块,可随时查看密封环磨损值,也可防止了密封环磨损超过极限位置。

(3)密封环与抗磨板硬度匹配得当。由于沿主轴与顶盖间隙漏出来的水压力在机组运行过程中存在变化,密封环与抗磨板难免会短时出现接触摩擦情况,若抗磨板相对于密封环硬度较小,就会出现抗磨板被密环磨出凹槽现象,改造后的密封环硬度低于抗磨板,避免了抗磨板磨出凹槽的可能。

4 结论

主轴密封作为水轮机重要的部件之一,其结构和工作原理并不复杂,但若其经常出现失效情况,不仅会产生高昂的维修费用,而且会对机组的安全运行产生隐患,在检修维护中总结存在的问题,分析原因,查找资料,选择成熟可靠的密封结构进行改造可从根本上解决主轴工作密封失效问题。

参考文献

- [1]尚天煜.立式水轮机组主轴密封漏水故障分析及处理方法[J].人民珠江,2023,44(S2):305-308.
- [2]张旭杰.皂市水电站主轴密封漏水分析及处理方法[J].珠江水运,2023,(05):100-102.
- [3]何兴民.碗米坡混流式机组水轮机主轴密封结构优化与改造[J].水利水电技术,2014,45(12):86-90
- [4]何兴民,彭赛文.混流式水轮机传统H型主轴密封结构改进[J].水电站机电技术,2023,46(02):27-29+113.