

水电站水轮机导叶密封磨损机理与检修更换工艺改进

张 宇

华电四川发电有限公司瓦屋山分公司 四川 眉山 620365

摘 要：导叶密封是水轮机的核心过流保护部件，其磨损失效会直接影响机组运行稳定性与密封性。本文结合水电站机组运行实际，从机械摩擦、水流冲蚀、挤压疲劳、腐蚀耦合及装配偏差五个维度，系统剖析导叶密封的多元磨损失效诱因。通过梳理传统密封检修更换流程，总结出拆卸损伤、清理精度不足、装配对位偏差等多项工艺短板，在此基础上针对性开展无损拆卸、精细化修整、精准装配及流程标准化等工艺优化，有效解决传统检修的质量隐患，提升导叶密封装配精度与运行使用寿命。

关键词：水轮机；导叶密封；磨损机理；检修工艺；工艺优化

引言：水轮机导叶密封作为水电站机组的关键易损部件，长期处于高速水流、泥沙冲击与交变载荷的复杂工况中，极易出现磨损、变形、泄漏等故障问题。密封失效不仅会造成机组漏水、发电效率下降，还会加剧导叶、轴套等核心部件的损耗，增加机组故障停机风险与检修成本。现阶段多数水电站仍沿用传统检修工艺，作业精度低、工序规范性差，难以适配机组长期稳定运行需求。因此，深入探究导叶密封磨损规律，优化升级检修更换工艺，对保障水电站机组安全高效运行具有重要现实意义。

1 水轮机导叶密封磨损机理分析

1.1 机械摩擦磨损机理

导叶在启闭动作中，密封面之间持续产生相对滑动，两表面微凸体相互啮合并发生剪切断裂，磨损碎屑随即脱离基体并堆积于接触区域^[1]。橡胶密封圈与金属表面之间的摩擦系数受介质温度与含水量影响较大，干燥状态下摩擦较高而润滑状态下则显著降低，这种交变特征使密封面磨损呈现非均匀分布态势。长期往复运动导致接触区域材料逐步流失，密封圈截面尺寸持续缩减，最终丧失弹性补偿能力。金属密封面在反复摩擦中产生加工硬化层，硬化层一旦碎裂便以片状形态剥落，形成典型的粘着磨损与磨粒磨损并存的复合破坏模式。

1.2 水流冲蚀磨损机理

高速水流携带泥沙颗粒对密封面实施持续冲击，每颗颗粒以一定入射角撞击金属表面时，局部产生极高的接触应力，使材料表面氧化膜瞬间崩裂并暴露出新鲜基体。新暴露的金属在含氧水体中迅速形成新的氧化膜，随后又被后续颗粒击碎，这一周期反复叠加便形成冲蚀坑并逐步扩展。导叶立面密封与端面密封所处流道具有不同的流速分布特征，高流速区域冲蚀速率明显高于低

流速区域，因此密封面磨损在空间上呈现明显的不均匀性。偏流工况下局部流速急剧增大，冲蚀破坏程度随之加重。

1.3 挤压疲劳磨损机理

导叶关闭状态下，相邻叶片之间以及叶片与抗磨板之间承受较大的接触压力，密封材料在持续高压作用下发生蠕变变形，内部产生微裂纹并沿应力集中方向逐步扩展。交变水压使密封面反复承受压缩与释放的循环载荷，材料表层与次表层之间因变形不协调而产生剪切疲劳裂纹，裂纹贯通后导致表层材料以片状或块状形式剥落。橡胶密封件在周期性挤压中出现永久变形与回弹能力下降，金属密封面则因疲劳而产生点蚀与剥落，两类材料的疲劳失效在时间尺度上呈现出明显的累积特征。

1.4 腐蚀耦合磨损机理

过流水体中溶解氧与金属密封面发生电化学反应，在表面生成一层疏松的氧化物薄膜，该薄膜附着力较弱，在水流冲刷与颗粒撞击下极易被破坏。薄膜破损后新鲜金属再次与水体接触并迅速生成新的氧化层，腐蚀与冲刷交替进行形成腐蚀磨损。酸性或碱性水质会加速电化学溶解过程，使金属基体损耗速率大幅提升。橡胶密封材料在含油或含化学添加剂的水体中发生溶胀与降解，体积与硬度发生变化，密封性能随之劣化，腐蚀介质与机械作用的叠加使密封面失效速度远超单一因素作用下的水平。

1.5 装配偏差引发的异常磨损机理

导叶安装过程中若出现立面间隙不均匀或轴向位置偏差，则部分密封面承受远超设计值的接触压力，而另一些区域则出现间隙过大导致水流直接冲刷密封面。连杆长度调整不当引起各导叶关闭不严密，个别叶片在运行中产生晃动，密封面在振动与水压的联合作用下加速

磨损。轴颈与轴套之间若存在偏心装配,则接触区域偏向一侧形成线接触甚至点接触,局部压强急剧升高,润滑膜被压溃后金属直接接触,磨损速率呈数量级增长。密封圈安装时压缩量不足或过大均会导致密封失效并引发异常磨损。

2 传统导叶密封检修更换工艺流程

2.1 导叶密封拆卸作业流程

检修工作启动前需将机组水轮机导水机构全关,释放接力器油压并锁定导叶在关闭位置。工作人员经人孔或尾水门进入底环与顶盖之间的检修空间,利用钢丝绳将各导叶捆绑固定,防止拆卸过程中叶片因水压或弹簧力意外开启^[2]。立面密封拆卸从导叶头部与尾部搭接区域入手,依次拆除固定密封条的压板与螺栓,取出磨损的橡胶密封条。端面密封拆卸需先拧松调节螺钉释放轴向压紧力,再逐一取下止推块与密封压盖。轴套密封拆卸涉及拆除上、下轴套的固定压环与球面轴承,操作人员需在狭窄空间内精确控制拆卸顺序,避免损坏导叶轴颈表面。所有拆下的密封部件按编号分类存放,防止混装导致回装错位。

2.2 密封部件清理与修整工序

拆下的密封面需用刮刀与细砂纸逐片清理残留胶层与氧化锈迹,金属表面须打磨至露出基体光泽。导叶头部与尾部的立面密封槽若出现深度沟痕,需采用堆焊方式填补凹陷,焊后用锉刀修整至与邻接面平齐。轴颈表面若存在失圆或拉伤,需在车床上进行少量车削,使圆度恢复至装配允许范围。橡胶密封条与密封圈需逐一检查弹性与尺寸,已发生永久变形或表面龟裂的部件直接报废。清理完毕后用压缩空气吹净所有沟槽与安装面,确保无杂质残留影响新密封件的贴合质量。

2.3 新密封装配安装工序

新密封条安装前需在密封槽内涂抹薄层润滑脂以降低装配摩擦阻力,橡胶密封条嵌入槽内后用木槌轻击到位,避免使用金属工具造成划伤。端面密封压盖按对角顺序交替拧紧螺栓,使压紧力均匀分布于密封圈四周。轴套密封安装时先将下轴套装入导叶轴颈,再依次装入轴承补套、球面轴承与O形圈,各部件之间涂抹专用润滑脂以减少运行摩擦。上轴套安装需在盘车至特定角度后从顶盖方向装入,压环与保护套的连接螺栓按规定力矩逐一紧固。

2.4 导叶密封对位与贴合调整工序

全部密封件装复后需进行全面的对位检查,导叶立面间隙使用塞尺逐片测量,不合格处通过调整连杆长度进行修正,使各叶片搭接面贴合紧密。端面间隙测量

需在全关与全开两个位置分别进行,上下端面间隙按设计要求分配,保证导叶关闭后止推面可靠接触且开启后不产生干涉。轴套与轴颈之间的径向间隙用压铅丝法测定,间隙超差时更换相应尺寸的衬套。接力器压紧行程通过撤除油压后测量活塞回退距离获得,数值需控制在规定范围内,过大则可能导致剪断销误动。最终进行静水压试验与动作试验,确认所有密封部位无泄漏且导叶开关灵活后交付运行。

3 传统检修更换工艺存在的缺陷

3.1 拆卸工艺对基体部件的损伤问题

导叶密封拆卸过程中常采用撬棒或錾子强行撬取密封条,金属工具与导叶立面接触时极易在密封槽边缘留下刮痕与凹坑,这些微观损伤在运行水压反复作用下会迅速扩展为宏观裂纹^[3]。轴套拆卸时若操作顺序不当,球面轴承与压环在无支撑状态下坠落撞击轴颈,造成表面局部压溃或划伤。端面密封压盖螺栓拆除时若未按对角顺序松弛,单边受力释放会导致导叶轴向窜动,轴颈与衬套之间产生刮擦。钢丝绳捆绑固定导叶时绳结受力不均,个别叶片被勒出绳印,绳印处金属表层产生塑性变形,后续装复新密封后该区域仍为应力集中点。

3.2 清理修整工序的工艺短板

传统清理多依赖人工刮削与砂纸打磨,操作力度与角度全凭经验把控,密封槽底面常出现过磨导致槽深超标,或局部残留胶层未清理干净便直接装复新密封。堆焊修复立面沟槽时焊层厚度控制精度不足,焊后修整多采用锉刀手工操作,平面度与相邻面的过渡平整度难以达到理想状态。轴颈车削量往往偏大以确保消除全部缺陷,导致轴颈直径缩小过多,后续需更换加大尺寸的轴套,增加备件成本与装配难度。

3.3 装配对位精度控制不足问题

密封条嵌入槽内后缺乏有效的定位工装,安装位置偏差完全依赖操作人员目测与手感调整,立面密封条中心线与导叶搭接面中心线常出现数毫米的偏移。轴套安装时上轴套与下轴套的同轴度依靠手动对中,在狭窄检修空间内肉眼对中精度有限,装复后径向间隙分布不均。端面压盖螺栓紧固力矩依靠扳手手感控制,不同操作人员施加的力矩差异较大,导致压盖倾斜与密封圈偏心压缩。

3.4 密封贴合均匀性管控缺失问题

传统工艺缺少密封贴合度的量化检测手段,橡胶密封条装复后是否在全长范围内与金属面紧密贴合全凭安装后的目视检查判断,局部悬空区域无法被及时发现。端面密封圈在压盖螺栓紧固后的径向压缩量是否均匀分

布缺乏测量工具支撑,个别部位压缩过度而另一些部位压缩不足的状况普遍存在。立面密封条搭接区域因各导叶关闭严密程度不一,贴合压力在周向分布极不均匀,高压区磨损加速而低压区泄漏频发。

3.5 工序衔接不合理造成的工艺隐患

拆卸与清理两道工序之间缺乏中间防护环节,清理后的密封面在等待堆焊或车削期间暴露于潮湿环境中,金属表面极易返锈。清理修整完成后至装配安装之间无防尘覆盖措施,沟槽内落入的沙粒与金属碎屑在装复后被密封件挤压嵌入接触面,形成人为磨粒源。各导叶密封更换按顺序逐片进行,已装复的导叶在后续相邻导叶拆卸过程中受到振动与飞溅物影响,新装密封件存在被二次污染与损伤的风险。

4 导叶密封检修更换工艺优化改进

4.1 无损拆卸工艺优化设计

传统撬棒强制拆卸方式改为液压拉拔与专用夹具配合的柔性拆除方案,橡胶密封条通过专用内嵌钢丝拉钩沿槽口缓慢抽出,金属密封面不再承受撬动产生的集中应力^[4]。轴套拆卸采用液压同步顶升装置替代手工敲击,球面轴承与压环在可控力值下逐级卸除,轴颈表面免受坠落冲击。钢丝绳捆绑固定改用尼龙绑带与定制抱箍,接触面增设橡胶垫层分散压力,消除绳印对导叶表层造成的塑性变形。压盖螺栓拆除引入电动扭矩扳手按对角顺序分级卸力,导叶轴向位置始终处于受控状态,避免单边释放引发的窜动与刮擦。

4.2 精细化清理与修整工艺改进

密封槽清理采用微型电动打磨头配合软质研磨片,操作力度由定转矩控制系统限定,槽底修整精度可控制在微米量级,杜绝过度打磨导致的槽深超标。残留胶层清除改用低温等离子射流技术,高温射流瞬间气化胶层而不损伤金属基体。轴颈修复由经验车削改为在线激光熔覆加精密磨削的组合工艺,材料补给量精确可控,轴颈直径缩减量大幅降低。焊层修整采用数控仿形铣削替代手工锉刀操作,平面度与过渡圆弧半径均能满足装配要求。

4.3 精准定位装配工艺优化

密封条安装配置专用导向模具,模具外轮廓与密封槽完全贴合,密封条推入过程中自动完成中心对中,安装偏差控制在亚毫米范围。轴套安装引入激光对中仪辅助定位,上轴套与下轴套的同轴度由仪器实时显示并指

导微调,径向间隙分布均匀性显著提升。端面压盖螺栓紧固采用液压拉伸器替代普通扳手,各螺栓施加力矩一致且可追溯,压盖倾斜与密封圈偏心压缩问题从根源上得到控制。

4.4 密封贴合微调工艺改进

立面密封条装复后采用定压塞尺沿全长逐点检测贴合状态,悬空区域通过注射专用弹性填缝胶进行局部填充,确保密封条与金属面全线紧密接触。端面密封圈压缩量利用超声测厚仪在装配前后分别测量,压缩不足处增加调整垫片,压缩过度处更换减薄型密封圈。导叶关闭后对立面搭接区域施加均匀压紧力,通过调整连杆长度使各叶片搭接面贴合压力在周向趋于一致。

4.5 工序流程整合与标准化优化

将拆卸、清理、修整、装配四道独立工序整合为连续流转的标准化作业链,各工序之间设置中间防护与质量检验节点,清理后的密封面立即覆盖防锈薄膜直至装配开始^[5]。全部操作编制为图文并茂的标准化作业指导书,关键力矩值与间隙参数以表格形式固化,不同检修人员执行同一标准可获得一致的装配质量。

结束语

导叶密封磨损是机械摩擦、水流冲蚀、挤压疲劳与腐蚀耦合等多因素叠加的结果,单一手段难以从根本上延缓失效进程。传统检修工艺在拆卸保护、清理精度、装配对位及贴合管控等方面的短板,直接制约了密封更换后的服役表现。通过引入液压拉拔拆卸、激光熔覆修复、专用模具定位及标准化作业链等改进措施,可有效控制基体损伤、提升装配精度并保障密封贴合均匀性。

参考文献

- [1]张雷,曹尊毅,王金亮,等.多沙河流水轮机活动导叶泥沙磨损数值模拟研究[J].水利与建筑工程学报,2022,20(3):1-7.
- [2]谭军,令狐争争,刘芮麟.老旧水轮机活动导叶端面密封改造[J].红水河,2022,41(2):131-135.
- [3]张树发.水轮机导叶接力器端面组合密封更换方案[J].设备管理与维修,2022(1):86-87.
- [4]梁恒.基于轴流转桨式水轮机新导叶安装后啸叫振动故障的快速诊断与处理[J].机电产品开发与创新,2024,37(6):130-133.
- [5]孙毅.水轮机导叶套筒反复漏水原因分析及处理[J].水电站机电技术,2024,47(8):87-90.