

贯流式水轮机伸缩节泄漏原因分析及处理工艺

赖艳丽, 周显栋, 刘剑雄

(中国水利水电第十工程局有限公司, 四川 成都 610036)

摘要: 阐述了对东萨宏水电站贯流式机组伸缩节漏水原因进行的分析及采取的检查与处理方法, 总结出一种工期短、成本低、效果好的处理工艺, 所取得的经验对存在同样问题的电站具有一定的借鉴意义。

关键词: 东萨宏水电站; 灯泡贯流式机组; 伸缩节; 漏水; 处理工艺

中图分类号: TV7; TV52; TV523; [TV734.1]

文献标志码: B

文章编号: 1001-2184(2024)03-0047-04

Analysis and Treatment Technology Adopted in the Leakage of Dismantling Flange of Bulb Type Hydro-turbine

LAI Yanli, ZHOU Xiandong, LIU Jianxiong

(Sinohydro Bureau 10 Co., LTD., Chengdu Sichuan 610036)

Abstract: Based on the analysis of the causes of leakage of dismantling flange of bulb type hydro-turbine units in Don Sahong Hydropower Plant and the introduction of inspection and treatment methods, this paper summarizes a treatment process with short construction period, low cost and good effect, it can be used for reference to the power stations with the same problem.

Keywords: Don Sahong Hydropower Plant; Bulb type hydro-turbine Unit; Dismantling flange; Water leakage; Treatment technology

1 概述

老挝东萨宏水电站是湄公河干流上的低水头径流式电站, 装有 4 台目前亚洲单机容量最大的灯泡贯流式机组, 其水轮发电机组由通用电气水电设备(中国)有限公司制造, 水利水电第十工程局负责安装, 水轮机型号为 GZ-WP-720, 为 4 叶片转轮, 最大水头为 19.8 m, 最小水头为 14.7 m, 额定流量为 400 m³/s, 额定出力为 66.5 MW, 年平均发电量为 20 亿 kW·h, 机组年平均运行小时数超过 8 300 h。

自 2019 年该电站 4 台机组全部投产发电以来, 各台机组先后出现了不同程度的伸缩节漏水问题, 严重的漏水造成伸缩节下方电缆桥架、润滑油箱、高顶油泵等设备长期处于恶劣的运行环境, 进而影响到设备的安全运行。针对所出现的问题, 项目部技术人员进行了深入的漏水原因分析及处理。

2 故障检查及漏水原因分析

该电站的伸缩节由 2 瓣组成, 组合缝处采用 1 道 Φ14 橡胶密封; 伸缩节与转轮室装有 2 道

Φ14 密封条; 伸缩节与尾水管装有 2 道 Φ10 密封条; 转轮室与伸缩节采用 Φ7281H8 ($^{+0.760}_0$)/Φ7280f7 ($^{0.210}_{-0.700}$) 的配合; 转轮室上的盘根槽深度为 12.8 mm±0.2 mm。

观察发现漏水较严重的 2 号机漏水主要是从伸缩节与转轮室的配合面漏出, 伸缩节与尾水锥管的组合面及伸缩节的分瓣处均无漏水情况。初步分析认为伸缩节漏水的原因可能是其结构设计的不合理、密封条劣化、装配不良等原因造成。

2.1 伸缩节结构设计的原因分析

由于漏水仅发生在伸缩节和转轮室的装配面, 而伸缩节的分瓣处以及伸缩节与尾水锥管之间的装配面的密封效果良好, 故在此不作分析。在不考虑转轮室和伸缩节安装误差的情况下, 伸缩节和转轮室装配面的单边间隙 h 为 $0.5^{+0.105}_{+0.730}$ mm, 经查阅设计图纸和机械手册得知, 该处的配合为 H8/f7 基孔制间隙配合, 该配合多用于长轴或多支承中等精度的定位配合^[1]。既能减小安装的难度, 又能防止将转轮室的振动传递到伸缩节。

收稿日期: 2024-02-28

由此来看,伸缩节的结构设计是合理的。

2.2 密封条选用的合理性分析

在伸缩节与转轮室之间平行布置了两道 Φ14 O 形橡胶密封,其中靠尾水管侧的密封安装在转轮室的密封槽内,而靠转轮侧的密封则安装在伸缩节端部的密封槽内。这两处密封的原理为:当 O 形圈被安装在沟槽和密封面之间后,密封条因受到沟槽和密封压板的挤压而产生弹性变形,由此而产生的反弹力起到了预紧或初始密封作用;在工作状态下,当流体通过间隙加到 O 形圈一侧的内压力进一步加大时,将 O 形圈推向沟槽的另一侧面而挤压变形成 D 形状态,并将这种压力传递到密封接触表面^[2]。

由此可知:影响密封效果的主要因素为密封条的压缩量 S 和工作状态时流体的压力。经查询运行人员记录的水力测量数据得知机组发电时该处的压力约为 0.16 MPa,且该压力随负荷和水头变化有小范围的波动;停机关闭尾水门时的压力约为 0.3 MPa,且其随着上游水位的变化而变化。通过数据分析可知:停机关闭尾水门时的密封效果优于发电运行时的密封效果,而且不论是发电或是停机状态,该处的压力值均不大,对密封效果的加强作用很有限。因此密封条的压缩量是该处密封效果的决定性因素。下文以水轮机家图上的数据为基础计算分析伸缩节出现漏水的原因。

O 形密封压缩量 S 按式(1)进行计算:

$$S=d_c-H \tag{1}$$

O 形密封压缩率 ϵ 按式(2)进行计算:

$$\epsilon=S/d_c \tag{2}$$

式中: d_c 为 O 形密封界面的直径; H 为密封安装间隙。

由厂家安装图计算得到的转轮侧密封安装间隙 $H_{\text{转}}=10.895^{+0.105}_{+0.505}$ mm;尾水管侧密封安装间隙 $H=13.3^{+0.095}_{+0.930}$ mm;O 形密封界面的直径 $d_c=14$ mm,代入相关公式计算得出:

- 转轮侧密封压缩量 $S_{\text{转}}=3.105^{+0.105}_{-0.505}$ mm;
- 转轮侧密封最大压缩率 $\epsilon_{\text{转max}}=21.4\%$;
- 转轮侧密封最小压缩率 $\epsilon_{\text{转min}}=18.6\%$;
- 尾水锥管侧密封压缩量 $S_{\text{尾}}=0.7^{+0.930}_{+0.095}$ mm;
- 尾水锥管侧密封最大压缩率 $\epsilon_{\text{尾max}}=5.6\%$;
- 尾水锥管侧密封最小压缩率 $\epsilon_{\text{尾min}}=0$ 。

综上所述,转轮侧的密封压缩率在 18.6%~21.4%之间,尾水锥管侧的密封压缩率在 0%~5.6%之间。一般来说,固定密封、往复运动密封和回转运动密封其压缩率应分别达到 15%~25%、10%~20%、5%~10%^[3]。笔者结合计算结果分析得知:转轮侧密封压缩率介于固定密封和往复运动密封之间,而尾水管侧的密封压缩率很小甚至可能出现没有压缩量的情况。由此来看:尾水管侧的密封发生泄漏的可能性很大。

为了解决 2 号机伸缩节漏水问题,该电站的维护人员在 2023 年 2 月机组 C 级检修期间进行了伸缩节检修工作,查看所拆出的密封条粘接良好且无老化,尾水管侧密封条的压缩变形很小,这一情况进一步印证了以上分析结果。但这一道密封压缩量不够会不会造成流道内的水穿透过密封盖下的密封即转轮侧密封出现泄漏还需要进一步分析其他因素。

2.3 针对伸缩节产生的锈蚀、振动等原因进行分析

东萨宏水电站检修人员在处理 2 号机组伸缩节漏水时发现在转轮室和伸缩节的装配面上出现了严重的锈蚀。

由于转轮室上的密封压缩量不够而导致流过机组的河水渗入到两道密封之间的空间中并与空气混合对金属进行氧化腐蚀,随着锈蚀逐步扩散到密封槽内,密封槽内即出现了明显的麻坑面,进而降低了密封表面的粗糙度。当密封面的粗糙度达到某个临界值时即会发生泄漏;另一方面,机组运行过程中的振动也是产生漏水的诱因之一。而引起转轮室振动的主要原因则是水力因素,振动的水力因素系指振动中的干扰力,其来自水轮机水力部分的动水压力,而产生振动的水力因素主要包括:水力不平衡、尾水管低频水压脉动、空腔汽蚀、卡门涡街、间隙射流等。当机组处在非最优工况或过渡工况运行时,机组各部位的振动明显增大^[4],实测得到的机组运行时转轮室下游 X、Y、Z 三个方向的振动幅度约为 0.10、0.09、0.05 mm,从而进一步加速了机组锈蚀和渗漏。

综上所述,伸缩节漏水的原因首先是转轮室上使用的橡胶密封偏小,其导致小的渗漏发生,随

之引发锈蚀,进一步发展为严重的外漏;其次,由于 4 台机组的漏水严重程度不同,可能是因为伸缩节的加工误差不同且因密封的压缩量存在差别;另外,由于 4 台机组的安装人员操作习惯不同,有些安装工会在密封槽及橡胶条上涂抹润滑脂,进而减少了振动时对密封的磨损,延缓了渗漏和锈蚀速度。

3 伸缩节漏水造成的危害

由于东萨宏水电站的来水量能供该电站全年满足四台机组运行发电,为减少停机时间、追求利益最大化甚至会取消或延缓年度检修,若要处理伸缩节漏水将会延长每年的 C 修工期 2~3 d,直接导致其发电收益减少,损失约为 90 000 \$/台·d。另外,因泄漏造成伸缩节所在的廊道层墙面破坏、电缆潮湿等问题将严重影响电站的形象面貌并造成涉水的润滑油泵、电缆、灯具等设备长期处于恶劣的运行环境,进而增加了故障率。

4 针对漏水采取的处理工艺、方法及取得的效果

为了处理伸缩节漏水,处理时应遵循工期短、成本低的原则,尽量不延长常规的 C 修工期。为此,项目部经研究后解决了以下几个问题:

(1)密封面的锈蚀问题。需要对已经生锈的转轮室和伸缩节密封沟槽及装配面进行除锈处理,以确保其既能达到密封效果,又能在其表面形成油膜,防止密封件处于干摩擦状态。若要达到机械设计手册中提出的粗糙度 Ra 小于 $3.2\ \mu\text{m}$ 的标准,必须将其运至机床进行加工,而老挝没有大型机加工设备,因此,在 2 号机检修时项目部采用的是在电站内使用电动工具除锈的方案,使用钢丝轮清除金属表面附着不牢的氧化皮、铁锈;再用钢丝轮进行抛光,使其表面恢复底材的金属光泽;对密封安装处再用毛毡抛光轮进行二次抛光,但因密封槽的尺寸较小,采用工具除锈效果有限。

(2)下游侧的密封压缩量不够问题。最直接的处理方法就是更换更大的密封条。若采用 $\Phi 15$ 的 O 形橡胶密封,其压缩率在 $5.1\%\sim 12.0\%$ 之间;若使用 $\Phi 16$ 的 O 形橡胶密封,其压缩率在 $11.1\%\sim 17.5\%$ 之间。但更换 $\Phi 15$ 或 $\Phi 16$ 的密封条虽然会增加压缩率,但过大的压缩量可能会将转轮室的振动传递到伸缩节及尾水管

基础上而造成伸缩节、转轮室的应力变形或螺栓疲劳剪断。该问题在阴新华^[5]关于飞来峡电厂伸缩节漏水分析的文章中已有论述,且改用大的密封未得到制造厂商的书面答复,存在一定的风险。该电站的技术人员也考虑过使用橡胶垫或石棉垫垫高沟槽的方式用以补偿密封压缩量不够的问题,但过多的搭接接头质量难以得到保证,最终放弃了该方案。顺着这个思路,技术人员想到了使用密封胶确保垫高层的整体性。在查询了乐泰 SI587 平面密封胶的技术参数后发现其完全固化后能够达到肖氏硬度 A40,这与橡胶 I-2 的硬度 $A55\pm 5$ 相差不大,因而可以用于垫高密封槽。使用 SI587 做垫高层还具有其他优点,比如在其固化前能很好地修补锈蚀产生的麻坑;另外,固化后其硬度略低于密封条,其可以有效地吸收机组运行时转轮室传递过来的径向振动。该电站的工程技术人员为防止密封胶因振动及河水侵蚀出现脱落,采取了在 SI587 垫高层外用 S20 乙丙烯橡胶自粘带做保护层进行防护,该材料可用于高压电缆接头的绝缘和密封防潮,其搭接处粘接牢固、密封效果好,拉伸后其厚度约为 0.4 mm。项目部经研究后最终决定采用 0.5 mm 厚的平面密封胶垫高层、外加 0.4 mm 左右的保护层进行防护。考虑到伸缩节回装后垫高层和保护层受压凹陷,其密封条的压缩率大概为 10% 左右。

(3)密封面防腐问题。常规的防腐即在金属表面除锈后涂抹防腐涂层。但普通的防锈漆无法长时间保留在有相对运动的金属表面,而使用吸附性强的涂料其涂层厚度较厚,导致其配合面的间隙无法满足且防腐工期长。此次检修、回装伸缩节前,在配合面使用了黏度较大的润滑脂均匀地涂抹了一层,其既能隔绝河水的腐蚀,又能给予密封件有效的润滑,能够延缓密封件的磨损;同时将试压孔的堵塞拧紧以防廊道层潮湿的空气进入两道密封之间的空腔。

以下是笔者通过 2 号机组处理经验总结出的密封沟槽修复施工工艺:

①使用钢丝轮、千叶轮对密封沟槽立面及底面进行初次除锈;

②使用 800 目砂纸对立面根部难以清理的部位进行补充除锈;

- ③使用清洗剂对密封沟槽进行清洗、脱脂;
 - ④将乐泰 SI587 平面密封胶均匀涂抹在密封槽底部,再用类似深度尺结构的专用刮板将其表面刮平,将胶层厚度控制在 0.5 mm 左右;
 - ⑤采取必要的防尘措施进行处理,待密封胶固化 24 h;
 - ⑥使用乙丙橡胶自粘带在平面密封胶上覆盖 1 层,其接头采用搭接方式,搭接的长度不小于 50 mm。搭接处应适当拉伸以减小接头处的高差;
 - ⑦手指按压修复层应无胶液露出、无明显的高差、橡胶带与密封胶接触面应平整、不留空隙。
- 采取以上方案处理后的 2 号机组伸缩节经过一年时间的考察达到了滴水不漏的效果,且伸缩节及转轮室的振动较另外 3 台未经处理的机组没有变化,符合工期短、成本低的检修原则。

5 结 语

经过细致的研究与分析得知:东萨宏水电站水轮机伸缩节产生漏水的主要原因为密封压缩量小及锈蚀。根据对 2 号机组实际检修经验进行总

(上接第 43 页)

情况,避免在强风、高温等天气恶劣时段进行施工作业。

(3)对于斜面混凝土的振捣应严格把控平面振捣系统的运行速度,振捣平面系统沿斜面长度方向的位移速度不宜小于 5 m/min,振捣幅与幅之间的搭接宽度不宜小于 30 cm,在格构梁等部位的转角处插入振捣器用以辅助振捣密实。

(4)混凝土浇筑后进行初期的养护工作,并适当覆盖保湿,避免混凝土表面开裂及强度降低。

(5)切割应在混凝土浇筑完成后 48 h 内进行,切割时的混凝土强度不得低于 5 MPa。切割应按先导缝、后结构缝的顺序进行。

4 结 语

通过该项目自主研发的桁架式开槽机以及对衬砌设备进行的改进,并在引江济淮 J009-1 标渠道混凝土衬砌施工中应用,严格按照相关技术要求施工,极大程度地提高了施工进度和工程质量,在受各种不可控因素严重影响工期的情况下,该标段仍能按照施工合同工期完美履约。改进后

结发现:采用该工艺可以在不改变原厂设计方案的情况下有效解决伸缩节漏水的难题。该工艺可应用到该电站另外 3 台机组伸缩节漏水问题的处理,并且对存在类似问题的灯泡贯流式水轮发电机组伸缩节的漏水检修具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 王长春,等,编著. 互换性与测量技术基础(3D 版) [M]. 北京:机械工业出版社,2018.

[2] 李新华,等,编著. 密封原件选用手册[M]. 北京:机械工业出版社,2018.

[3] 黄志坚,等,编著. 工业设备密封及泄漏防治[M]. 北京:机械工业出版社,2014.

[4] 莫道明. 灯泡贯流式水轮机转轮室伸缩节改造[J]. 水利水电技术,2014,45(12):58-64.

[5] 阴新华. 飞来峡电厂水轮机组伸缩节漏水原因分析及技术改造[J]. 广东水利水电,2019,48(8):76-78.

作者简介:

赖艳丽(1979-),女,四川威远人,工程师,从事水电站运行维护及 HSE 管理工作;

周显栋(1990-),男,湖南常德人,工程师,学士,从事水电站运行维护管理工作;

刘剑雄(1973-),男,四川新津人,高级技师,从事水电站设备安装及运行维护管理工作.

(编辑:李燕辉)

的混凝土衬砌机月平均生产进度能力比原来的普通衬砌机提高了 2 倍,在质量上更能得到保证。最终该标段在引江济淮众多标段中获得了工期先进,质量创优等多项奖励,成为大型渠道工程施工质量、进度优秀的典范。成功的实践证明了渠道衬砌机改进后的科学性和实用性,极具推广价值。

参考文献:

[1] 张小刚,刘登超,陈崇德. 削坡机在大型渠道施工中的应用[J]. 科技创业,2013,26(9):177-178.

[2] 李伟. 南水北调南阳市段 4 标渠道混凝土衬砌试验方案[J]. 科技创新与应用,2015,4(16):190.

[3] 王步新,王乃超,李进亮. PHQZJ—I 排振滑模式坡面砌筑机混凝土施工工法[J]. 水利建设与管理,2011,31(9):11-14.

[4] 张国清. 渠道混凝土衬砌施工工艺探讨[J]. 赤子(上中旬),2014,14(21):327.

[5] 刘湘军,雷国强,陈维. 浅谈南水北调中线干线镇平三标渠道混凝土衬砌施工技术[J]. 四川水力发电,2013,32(增刊 1):106-109.

作者简介:

贺 燕(1976-),女,四川岳池人,工程师,注册一级水利造价师,注册二级建造师,注册监理工程师,从事水利水电工程建设造价与施工技术管理工作.

(编辑:李燕辉)