

万家寨水利枢纽尾水检修门槽水下缺陷成因分析与修复方案研究

薛楠 赵鹏亮

黄河万家寨水利枢纽有限公司 山西 太原 030000

摘要: 水工建筑物的冲蚀磨损是水利工程的运行管理过程需要面临的关键性问题。对于水位线以下的水工建筑物实体部位,由于长期处于水下,工作环境恶劣,产生的混凝土缺陷又难于检测,同时受困于修补材料、施工工艺和设备的影响,水下混凝土缺陷修复一直是困扰水电站大坝安全运行的一个难题。文中以工程实例为研究背景,介绍了高含沙河流上泄水建筑物的冲蚀磨损破坏情况,分析造成该问题的主要影响因素,并提出了行之有效的冲蚀修补方案,为类似工程提供借鉴经验。

关键词: 水下缺陷处理;尾水门槽;水工建筑物;维修养护

1 工程概况

万家寨水利枢纽位于黄河北干流托克托至龙口峡谷河段内,是黄河中游梯级开发的第一级。坝址左岸隶属山西省偏关县,右岸隶属内蒙古自治区准格尔旗。枢纽的主要任务是以工业、城市供水为主,兼有发电、防洪、防凌等综合效益。枢纽属I等大(1)型工程,永久性主要建筑物为1级水工建筑物。枢纽由拦河坝、泄水建筑物、电站厂房、开关站、引黄取水口等建筑物组成。电站厂房内装有6台单机容量180MW的发电机组,总装机容量1080MW。

1#~6#机组尾水管均由中墩分隔成两个出口,每个出口设置尾水检修门槽一道。机组尾水出口底板高程881.03m,设8.3×7.73(m,宽×高)尾水检修闸门,主要用于机组检修作业。此外,2#~6#机组右侧门槽在高程890.00m处设有排沙孔出口,通过将尾水检修闸门安装两节拉杆锁定,可兼作排沙洞出口检修闸门。

枢纽尾水检修门槽投入运行至今已逾20年。近年来,在排沙钢管孔泄洪排沙运用之后,由检修孔进入排沙孔出口段内部检查发现,部分门槽混凝土冲蚀破坏,金属埋件部分脱落,导致尾水检修闸门封水不严,影响电站排沙系统的安全运行。

2 尾水检修门槽混凝土及金属埋件破坏情况

为全面查明尾水检修门槽的水下缺陷状况,特委托专业的水下检测团队,针对尾水检修门槽混凝土及金属埋件开展全方位的水下检查工作。检查范围涵盖1#~6#机组尾水检修门槽、排沙孔出口的混凝土及埋件等,水下检查及摄像作业区域主要集中在尾水出口底板高程881.03m至机组全停机尾水位898.00m之间。

经检查发现,排沙洞出口对应位置的尾水闸墩普遍存在混凝土冲蚀破坏现象,冲蚀深度在30~40cm之间,部分区域的埋件缺失。同时,机组检修闸门底坎等部位也存在不同程度混凝土剥蚀情况。机组尾水检修门槽、排沙钢管出口段混凝土及埋件共存在14处缺陷,具体分布如下:

1#、2#、5#机组尾水检修门槽底板混凝土呈现不同程度的冲刷、淘空现象,其中5#机组的情况最为严重。

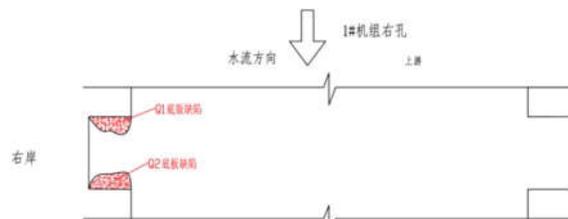


图1 1#机组尾水门槽底板缺陷



图2 2#机组尾水门槽底板缺陷



图3 5#机组尾水门槽底板缺陷

2#、3#、6#机组尾水检修闸门排沙孔段对应门槽下游侧混凝土冲刷破坏严重，存在钢衬埋件缺失情况；4#、5#机组尾水检修闸门排沙孔段对应门槽下游侧、门槽内侧混凝土均冲刷破坏严重，同样存在钢衬埋件缺失情况。此外，5#机组排沙洞钢衬出现一处小幅破损。

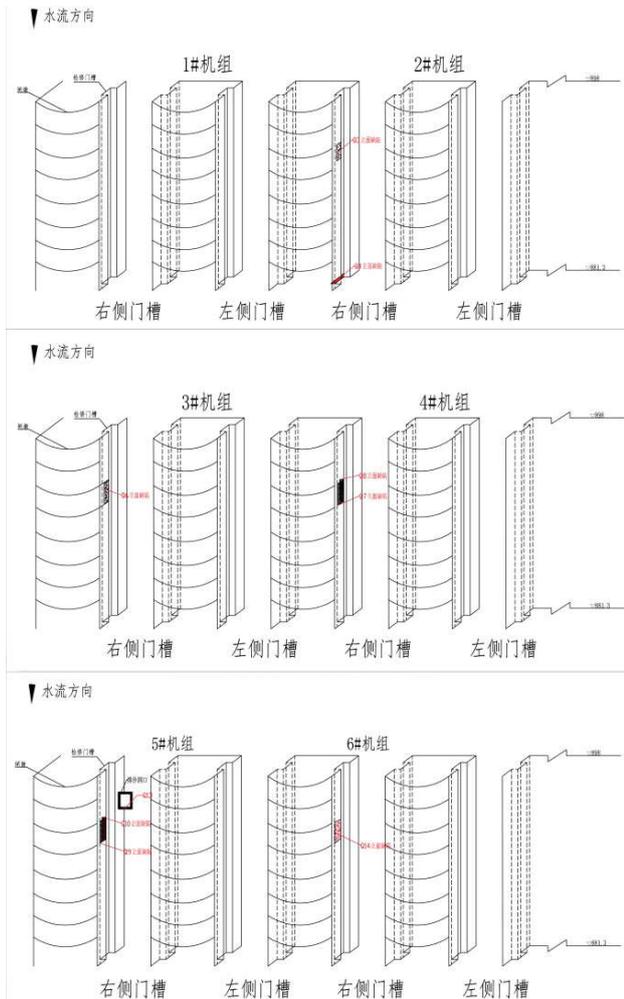


图4 2#~6#机组尾水门槽缺陷

3 缺陷原因分析

3.1 门槽及排沙钢管出口段缺陷原因分析

在防止机组检修时电站进水口被泥沙淤堵，并减少发电过程中有害粒径泥沙对水轮机的影响，近年来万家寨、龙口水利枢纽联合敞泄排沙调度运用已逐渐成为每年汛期的常态运用方式^[1]。在此期间，排沙钢管承担着泄水排沙的重要任务，每年平均运行时长约为50~60h。排沙洞出口采用射流消能方式，水流从排沙洞喷射后，排沙钢管出口段流速由9.86m/s突增至25.23m/s。高流速、高含沙水流携带悬移质或推移质，具有较大动能^[2]。当这些物质冲击过流表面时，会对过流部件造成严重的沙粒冲蚀磨损。混凝土表面的砂浆因强度相对较低，首先受

到冲蚀，原本光滑的泄流表面开始出现冲坑，进而形成局部损坏，并逐步扩大。由于碳素钢的抗冲磨性能低于混凝土，在相同的水流冲刷作用下，金属结构的冲蚀损坏程度相较于混凝土更为严重^[3]。例如，Q3、Q4、Q6、Q7、Q8、Q9、Q10、Q13、Q14等缺陷主要集中于排沙钢管出口段对应的高程部位，该部位的冲蚀破坏程度相较于门槽内其他区域更为显著。

3.2 门槽底坎缺陷原因分析

除尾水检修门槽在排沙钢管出口段对应高程部位存在较为严重的冲蚀破坏外，部分机组尾水检修门底坎也出现了局部轻微破坏情况。机组发电过程中，除低水位运行阶段水质较为浑浊、泥沙含量较高外，其余大部分时间机组水质较为清澈、泥沙含量较低。引水经过水轮机消能后，动能降低，对混凝土结构的磨蚀作用相对较小且较为均匀。然而，流道内及尾水检修门底坎存在的块石堆砌，在水流的推动下，会对底坎混凝土产生撞击与摩擦，从而导致底坎混凝土受损，如Q1、Q2、Q5、Q11、Q12等缺陷。

4 施工材料选择

鉴于冲蚀缺陷位于机组全停机尾水位以下，且临近机组流道出口，若采用创造干地施工条件的方式，不仅工程量巨大、造价高昂，而且工期较长，无法满足枢纽当前的运行实际需求。故而，选择潜水员水下作业的修复方式，该方式具有施工工期短、成本低以及施工便捷等优势。由于确定采用水下施工方式，普通混凝土浇筑时会受到周围环境水的强烈影响，当混凝土拌合物穿过较厚的水层时，骨料容易与水泥分离，并较快沉至水底，而被水冲刷下来的水泥颗粒，部分会被水流带走，部分则会长时间处于悬浮状态。当水泥再次下沉时，有时已呈凝固状态，失去了胶结骨料的能力。如此一来，浇筑的混凝土拌合物会出现分层现象，形成一层砂砾骨料和一层薄且强度极低的水泥絮凝体或水泥渣，无法满足工程质量要求。经过对多种修复材料的性能对比，并参考其他大型水利工程修补施工的应用实例，最终决定采用水下环氧类材料进行修补浇筑。

本次水下混凝土缺陷维修处理选用水下环氧混凝土、环氧砂浆，并采用HSL-101水下环氧添加剂，与砂石骨料、水泥或填料混合配制而成。该材料可直接应用于水下混凝土建筑物的缺陷修补、加固及防护处理，无需创造干地施工环境。其在水中具备良好的工作性能，能够实现自流平与自密实，固化后强度较高，抗压强度可达90MPa以上，同时具有良好的抗冲耐磨、抗渗以及抗冻性能，与原混凝土基面的粘结强度较高。

5 水下缺陷处理

5.1 门槽底板部位混凝土修补

检修门槽底板及门槽外侧底板出现了不同程度的冲坑,经分析系水流冲刷所致,最大冲刷深度在4cm~8cm之间,且存在少量钢筋外露情况。依据相关规范要求,针对此类因磨蚀导致的混凝土剥蚀缺陷,采用填充锚固法进行修复,使用环氧混凝土(或砂浆)进行浇筑,浇筑层厚度不小于5cm,强度等级不低于C35。对破损深度5cm及以上区域植设插筋、架立钢筋网后浇筑水下环氧混凝土,对破损深度5cm以内区域涂抹水下环氧砂浆。

对于Q1、Q2、Q5、Q11、Q12这5处门槽底坎缺陷按照原设计体型恢复,将最大冲刷深度不满足要求的缺陷内部凿至5cm深以上,按照规定的间排距以及锚固参数植入锚筋、架设钢筋网,浇筑水下环氧混凝土。

5.2 门槽反轨体型改造

4#机组、5#机组检修门槽下游外部出现两处缺棱掉角情况。经检测,这两处缺陷在门槽外部的最大冲刷深度约为0.3m,而在门槽内部的最大冲刷深度相对较小,介于7cm~8cm之间,且反轨表面的钢板已缺失。这是由于埋件在水流的强烈冲击作用下发生变形并掉落,同时其下方的混凝土也遭到冲刷侵蚀。鉴于排沙洞的运行条件并未发生改变,若按照原设计恢复金属埋件,排沙洞运行时射出的水流仍可能对埋件造成同样的破坏。经综合考虑,决定在4#、5#机组889.30m~893.00m高程范围内尾水检修门槽反轨处取消金属埋件,转而采用抗冲磨消能较强的水下环氧混凝土浇筑,并将其按倒角34°的弧面进行修型,这种平滑的夹角能够在一定程度上有效抵御水流的集中冲刷,从而减小冲蚀破坏既能保证反轨处水流的平滑过渡。

对于Q7、Q8和Q9、Q10这两处门槽外角因冲刷而掉棱的缺陷,首先将缺失埋件的边界切割打磨整齐,同时对周边的混凝土进行切割修整,然后对内部采用填充锚固法进行处理。在修补过程中,直接浇筑水下环氧混凝土将冲蚀部位填平,并将新修补门槽内部和外部的夹角修整为34°的圆弧倒角。

5.3 门槽外立面混凝土修补

下游门槽外立面呈现出多处冲坑,这些冲坑面积较

大且深度较深,均在0.3m以上,破坏程度较为严重,钢筋外露情况尤为突出。由于钢筋失去了混凝土保护层,直接暴露于水中,极易发生锈蚀。而钢筋一旦锈蚀,又会进一步加速混凝土的破坏,如此便形成了恶性循环。

对于Q3、Q4、Q6、Q14这几处露筋的缺陷,修补重点在于处理锈蚀钢筋。具体而言,小面积锈蚀区域,可采用除锈剂结合高压水冲洗等方式处理;大面积锈蚀区域,则需依据水下实际状况,选择割除原钢筋,重新植入钢筋并布设钢筋网,为后续浇筑水下环氧混凝土做好准备。而后支立模板浇筑水下环氧混凝土。

5.4 排沙洞钢衬部位修补

5#机组排沙洞钢衬出现了一处损坏,其下的混凝土形成一个小凹坑,此系高流速、高含沙水流自排沙洞喷射而出后,水中砂石冲击所致。针对Q13缺陷,先进行抛磨处理,对埋件冲蚀边界部位进行水下规则切割,切割完成后采用液压镐凿除底层疏松混凝土,回填水下环氧混凝土至原基面。

6 结语

本次针对尾水门槽展开的水下缺陷维修处理工程,从材料选择到施工工艺,充分考虑工程实际情况与水流作用特点,针对不同类型与部位的缺陷,经严谨分析与论证,制定并实施了一系列行之有效的冲蚀修补方案。自工程实施完毕投入实际运行以来,整体运行情况良好,在保障枢纽安全稳定运行以及排沙系统功能恢复等方面均达到了预期效果。在整个维修处理过程中,所选择的水下环氧类材料及其配套施工方案,展现出高度的适配性与可靠性,不仅解决了当下尾水门槽水下缺陷的修复难题,其成功经验更为枢纽其他类似部位以及高含沙河流上同类泄水建筑物应对水下混凝土缺陷、金属埋件损坏等问题时,提供了极具价值的参考依据。

参考文献

- [1]魏向阳,赵龙,肖曼珍.2024年黄河流域水旱灾害防御工作[J].中国防汛抗旱,2024,34(12):17-19.
- [2]李浩平,李峰.挟沙水流对混凝土的冲磨机理研究及冲磨试验机研发[J].机械研究与应用,2011,24(02):37-40.
- [3]吴凌丞,郝楠,赵朋.黄河万家寨水利枢纽排沙钢管冲蚀破坏修复[J].水电与抽水蓄能,2018,4(02):106-111.