

# 水电站冬季闸门更换施工方案研究

李高扬

宁夏黄河水电青铜峡发电有限公司 宁夏回族自治区 青铜峡市 751600

**【摘要】**：水电站泄水建筑物的闸门是控制水流的关键核心设备，其性能直接关乎电站防汛安全与大坝运行稳定。闸门长期水下运行易出现锈蚀、磨损、水封损坏等问题，受主汛期制约，更换工作多在冬季非汛期进行，低温环境给施工带来技术难度高、管理复杂等挑战。本文结合理论与实际案例，以青铜峡水电站 1-15 号泄水管工作闸门更换工程为基础，对适配冬季低温工况的闸门更换方案加以探究，为北方寒冷地区水电站冬季施工提供理论与实践参考。

**【关键词】**：水电站；冬季施工；闸门施工；低温环境；施工方案

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.009

## 1 引言

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 水电站闸门的作用

水电站泄水建筑物闸门是工程核心设备，承担着防汛、调控水位、保障水库运行安全的关键职能，直接关系大坝安全与下游人民生命财产安全。汛期可通过调节闸门开度控制下泄流量，将水位控制在汛限水位以内，防范洪水漫坝、溃坝、水淹厂房风险；非汛期关闭泄水建筑物，结合机组负荷的调整来满足下游用水与河道生态需求，保障电站经济稳定运行。

#### 1.1.2 冬季施工的特殊性

冬季非汛期是水电站入库流量最低时段，水量相对平稳，是闸门更换施工的窗口期，但低温环境、日照时长短、环境恶劣等因素给施工带来多重挑战。低温会显著增大金属材料脆性，普通钢材在-20℃环境下冲击韧性下降超 50%，焊接时易产生裂纹，焊缝热量散失快，还易形成淬硬组织，进一步提升焊接缺陷发生率。同时，低温会导致起重设备油液黏度增大，液压系统压力不稳，电气控制系统易出现接触不良，设备启动与运行风险提升。此外，施工区域积雪结冰会增大人员高空坠落、设备支撑打滑风险，冬季昼短夜长也压缩了有效施工时间，对施工计划安排提出更高要求。

#### 1.1.3 闸门更换的必要性

随着水电站运行年限增长，闸门金属结构易出现锈蚀、磨损、疲劳裂纹等隐患，引发水封失效、启闭受阻、结构强度下降等缺陷，严重威胁电站运行安全。以青铜峡水电站为例，电站 1-15 号泄水管工作闸门于 1988 年投运，为动水启闭，长期处于水下多泥沙、高流速环境，震动导致门叶局部塑性变形、水封干涉损坏，水流冲刷气蚀面板及紧固螺栓等问题，已无法满足安全运行要求。据统计，运行 20 年以上的水电站闸门，金属腐蚀厚度平均可达 2-3mm，而频繁启闭带来的反复应力作用，会导致疲劳裂纹持续扩展，极端情况下可能引发门叶节间把合螺栓断裂。同时，转动部件磨损会增大闸门启闭阻力，加剧启闭设备负荷，易引发设备故障。因此，及时对老化、受损

闸门进行更换，是保障水电站安全运行、提升发电效益的必要举措。

## 2 冬季施工环境分析

### 2.1 冬季气候特征对施工的影响

#### 2.1.1 低温对材料性能的影响

低温环境下，金属材料原子热运动减弱，位错运动受阻，脆性显著提升，焊接接头与安装部位易出现裂纹，直接影响闸门结构安全。低温环境会加速焊接区域热量散失，焊缝快速冷却易生成淬硬组织，进而增加裂纹形成风险；同时，低温还会造成焊条药皮受潮，最终引发焊缝气孔缺陷。低温作用于混凝土材料时，会减缓其水化反应速率，阻碍强度提升；同时混凝土内部水分结冰导致体积膨胀，易诱发结构裂缝并降低结构耐久性。常见钢材低温性能如表 1 所示。

表 1 常见钢材低温性能参数

材料类型	适用温度范围	冲击韧性 (-40℃)	焊接性	耐腐蚀性
Q355B	-20℃以上	15-20J	中等	一般
Q345E	-40℃以上	≥34J	良好	一般

#### 2.1.2 施工设备的耐寒性

低温环境对施工设备运行性能影响显著。低温会导致机械设备润滑油黏度增大、流动性下降，设备启动阻力与运转部件摩擦力显著提升，加剧设备磨损；电动机具电池化学反应速率降低，容量与输出电压稳定性下降；发动机燃油雾化效果变差，启动受阻。设备中的橡胶密封件与塑料管件在低温环境下易发生脆化断裂现象，此现象会导致密封失效和管路受损等问题，进而致使液压系统出现压力不稳定状况，影响设备的正常运转。

#### 2.1.3 冰冻的影响

冬季环境，低温导致闸门门叶温度处于零下，入水后易出现冰冻，会导致滚轮等转动部件冻结卡顿，安装调试困难；冰

屑还可能割裂水封橡胶，影响闸门密封性能。同时，施工区域积雪结冰会导致起重设备支撑打滑失稳，增加作业安全风险；焊接部位温降加速，提升焊接难度与缺陷发生率，产生冻损。

### 3 闸门更换施工关键技术

#### 3.1 施工方案设计

##### 3.1.1 方案设计原则

冬季闸门更换施工方案设计需遵循安全性、经济性、高效性相结合的核心原则。安全为首要原则，需针对冬季施工高风险特性，制定施工“四措两案”，落实“三个一律、三个一切、四个凡事”工作要求；经济性原则要求在保障质量与安全的前提下，通过工序优化、资源合理配置把控施工进度；高效性则要求甲乙双方紧密配合，协调作业现场资源，合理调配机组运行方式，为闸门更换创造最优条件。

##### 3.1.2 方案优化措施<sup>[3]</sup>

结合冬季施工特点，从多维度开展方案优化。施工时序上，优先利用每日 10 时-16 时午间高温时段开展焊接等对环境温度要求较高的作业，并在低温时段开展吊运、装配等受温度影响较小的工作，最大化利用有效施工时间。材料选型上，闸门主体结构选用 Q355C 钢板，其低温冲击韧性较普通钢材提升 30% 以上，有效保障低温环境下结构安全。设备优化方面，在尾水专用门机电气室加装保温装置，司机室加装供暖设施，保障设备低温环境稳定运行。工序衔接方面，结合机组检修窗口期，提前完成旧有闸门倒运、冲淤、检修闸门落门等前置工作，合理规划闸门吊运与场地使用，避免工序交叉干扰；考虑大件运输与路途中的不可控因素，预留运输区间。同时健全现场管理制度，明确人员分工，加强四措两案执行力，合理安排作业时间。

#### 3.2 冬季施工主要技术难点及解决方案

##### 3.2.1 低温焊接技术

低温环境下焊接热量散失快，焊缝易出现淬硬组织与裂纹，环境温度低于-10℃时，焊接裂纹发生率提升 30%-50%，是冬季施工的核心技术难点。本次施工针对现场焊接作业，选用 ER50-6 低温焊丝，其-30℃环境下冲击韧性仍保持在 27J 以上，屈服强度超 400MPa，抗拉强度超 500MPa，可有效降低低温环境下焊接裂纹产生概率。同时实施焊前预热处理，根据钢材材质、厚度与环境温度，采用电加热或火焰加热方式对焊接部位预热，焊接过程中严控层间温度不低于预热温度，减缓焊缝冷却速度。此外，优化焊接工艺参数，采用小电流、快速焊接工艺，严控焊接线能量输入，焊前清理焊缝表面杂质，焊后实施后热与保温处理，消除焊接残余应力，全面保障低温环境下焊接质量。

##### 3.2.2 低温止水密封技术

低温环境下普通橡胶材料会变硬脆化，弹性与密封性能显著下降，温度低于-10℃时，密封性能下降 30%-50%，易引发闸门漏水故障。本次新更换闸门采用上游止水形式，顶、侧水封为 P 型止水，底水封为条型止水，止水橡胶选用 6674 型耐寒止水橡胶，通过添加增塑剂与耐寒剂降低玻璃化转变温度，配合先进硫化工艺，大幅提升低温环境下的柔韧性与密封性能。水封垫板、压板均采用 12Cr18Ni9 不锈钢材质，提升抗腐蚀与抗气蚀能力。安装过程中严控密封面清洁度与平整度，精准控制安装位置，避免橡胶过度拉伸、挤压，安装完成后通过渗漏测试检验密封性能，确保低温环境下止水效果达标。

##### 3.2.3 冰冻期水流控制与排水技术

冰冻期水流控制是水电站冬季施工的重要管控内容，合理的导流渠与排水系统布置，可有效引导水流，防范冰凌堵塞、积水结冰引发的施工事故，及时排除施工区域积水，为施工创造安全环境。本次泄水管闸门更换工程未涉及大范围排水控制，但该技术仍是北方寒冷地区水电站冬季闸门施工需重点考量的内容。

##### 3.2.4 安全管理技术

针对冬季施工冰雪湿滑风险，在施工通道、尾水平台、门槽盖板等易滑部位铺设防滑垫，设置防滑警示标志，安排专人及时清理作业区冰雪，保持作业面干燥整洁。为作业人员配备防寒服、防寒手套、保暖鞋等劳动防护用品，保障作业人员职业健康与安全。密切跟踪气象预报，及时获取气象预警信息，遇极端天气立即停止户外作业，组织人员与设备采取防护措施，最大限度降低极端天气对施工安全的影响。

## 5 案例分析

### 5.1 青铜峡水电站闸门冬季更换工程概述

#### 5.1.1 工程背景<sup>[1]</sup>

青铜峡水电站位于黄河上游青铜峡峡谷出口处，是黄河上游龙羊峡至青铜峡段最后一级梯级水电站，是以灌溉、发电为主，兼顾防洪、防凌的大（II）型水利枢纽工程，枢纽总长 687.3m，最大坝高 42.7m，9 台机组总装机容量 345MW，工程于 1967 年首台机组发电，至今已运行 58 年。电站泄水管工作闸门已运行 30 余年，长期处于黄河多泥沙水质工况，面板、紧固件气蚀与部件磨损严重，已无法满足安全运行要求，需实施整体更换。

#### 5.1.2 施工难点分析

受黄河宁夏段汛期（5-10 月）制约，工程施工期安排在非汛期 11 月至次年 4 月，全程跨越冬季，施工面临多重难点。一是低温对金属材料与焊接作业影响显著，青铜峡冬季平均气温-10℃-3℃，极端寒潮天气气温大幅下降，金属材料脆性提升，

焊接熔合性变差,易产生焊接裂纹等缺陷;二是低温环境下金属结构入水后易结冰,导致闸门定轮等转动机构卡顿,影响闸门启闭与安装调试;三是冬季有效作业时长短,需在非汛期内完成全部闸门更换,工期紧张,对施工组织管理要求高。

### 5.3 施工效果

#### 5.3.1 制造与施工工艺创新<sup>[1]</sup>

本次闸门更换通过多项工艺创新保障施工质量:结构上采用单节门叶结构,通过工字型主梁预组焊、隔板T型结构模装工艺,有效控制焊接变形;定轮装置采用35CrMo锻钢调质处理,轴孔加工精度达IT7级,保障转动灵活性;水封系统采用P型止水橡胶与不锈钢压板组合,通过热硫化焊接工艺实现零渗漏;防腐采用电弧喷涂热喷锌+环氧磷酸锌封闭层+环氧云铁中间漆+超强环氧耐磨面漆的复合涂层体系,盐雾试验达1000小时以上;吊装采用2×50吨尾水门机与100吨汽车吊协同作业,通过优化吊点设计,控制闸门入槽偏差在±2mm以内。

#### 5.3.2 质量管控成果<sup>[2]</sup>

建立全流程质量管控体系,焊接完成后金属探伤显示,I类焊缝实现100%超声波探伤+射线探伤,检测覆盖率100%,所有质量控制点100%合格,核心技术指标均优于规范要求:门叶平面度≤2.0mm,定轮共面度≤1.5mm,水封压缩量8-12mm;设计水头25m工况下,水封漏水量≤0.1L/s·m,启闭力波动系数<5%,全面满足设计与电站安全运行要求。

## 6 成果与建议

### 6.1 适应冬季低温环境的闸门更换措施

#### 6.1.1 低温材料适配技术

针对冬季低温工况,建立完善的材料适配体系。主体钢材选用Q355C低合金高强度钢,-20℃环境下冲击功≥34J,低温韧性较传统钢材提升40%;焊接材料匹配ER50-6低温焊丝与

E5015-G焊条,保障低温环境焊接性能。止水系统选用耐温-40℃的6674型三元乙丙橡胶水封,配套12Cr18Ni9不锈钢压板,采用硅酮耐寒密封胶填补界面间隙,通过热硫化焊接工艺保障转角密封效果,全面适配低温施工与运行要求。

#### 6.1.2 施工组织管理优化

施工前全面收集工程所在地冬季气象数据,结合工程特点优化施工进度计划,最大化利用高温时段与有效作业时间,合理排布施工工序。建立专业的施工技术与管理团队,定期开展冬季施工安全技术培训与交底,提升作业人员专业能力。针对冬季施工特点,优选耐寒型施工设备,落实设备防寒保暖措施,严控材料采购、运输、储存全流程质量,避免材料低温冻损。安装过程中严控测量精度,重点管控低温环境下止水装置安装质量,确保闸门安装精度与运行性能达标。

### 6.2 对未来研究的建议

#### 6.2.1 技术研发方向

材料方面,需研发更高低温韧性、抗裂性能的钢材,以及耐低温性能更优的密封材料,从材料层面提升冬季施工适配性;设备方面,加大低温专用施工设备研发力度,优化起重、焊接等设备的耐寒结构与保温系统,提升极寒环境下设备运行的可靠性与稳定性;工艺方面,探索低温环境下自动化、智能化施工技术与快速施工工艺,减少人工户外作业风险,提升施工效率与质量稳定性。

#### 6.2.2 管理体系完善

建议构建水电站冬季施工经验的数据库,把既往工程的施工方案、技术措施、质量安全管控等相关数据以及经验整合起来,给后续的工程提供参考借鉴。构建冬季施工专家的指导机制,给同类型工程给予技术支撑。并推动开展冬季施工信息化管理体系建设工作,借助信息化技术达成施工进度、质量以及安全的实时监控,提高管理效率,使决策更加科学。

### 参考文献:

- [1] 青铜峡水电站1号-15号泄水管工作闸门更换施工四措两案.
- [2] 青铜峡水电站1号-15号泄水管工作门改造-闸门设备采购及伴随服务竣工报告.
- [3] 青铜峡水电站泄水管工作闸门改造竣工设计报告.