

水利工程金属结构钢闸门制造及安装技术研究

姜军杰

新疆水发建设集团有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i6.6403

[摘要] 钢闸门作为水利工程中直接承受水动力荷载的核心设备,其技术特性与制造安装工艺需深度适配高水压、强腐蚀、高速水流等复杂工况。本文系统分析钢闸门在水利工程中的功能需求,从材料选型、结构设计、制造工艺、安装调试及质量控制等维度展开技术研讨,重点阐述高强度钢材应用、抗空蚀结构优化、智能焊接技术及数字化安装工艺等创新成果,为提升钢闸门全生命周期性能提供理论支撑与实践指导。

[关键词] 钢闸门; 高水头工况; 抗空蚀设计; 智能焊接; 数字化安装

中图分类号: TV663 **文献标识码:** A

Research on Manufacturing and Installation Technologies for Metal Structures of Hydraulic Engineering Steel Gates

Junjie Jiang

Xinjiang Shuifa Construction Group Co., Ltd.

[Abstract] As the core equipment directly subjected to hydrodynamic loads in water conservancy and hydropower projects, steel gates must align their technical characteristics and manufacturing/installation processes with complex operating conditions such as high hydraulic pressure, severe corrosion, and high-velocity water flow. This paper systematically analyzes the functional requirements of steel gates in hydraulic engineering, conducting technical discussions across dimensions including material selection, structural design, manufacturing processes, installation/commissioning, and quality control. It focuses on innovative achievements such as the application of high-strength steel, optimization of anti-cavitation structures, intelligent welding technologies, and digital installation techniques, providing theoretical support and practical guidance for enhancing the full-lifecycle performance of steel gates.

[Key words] steel gates; high-head operating conditions; anti-cavitation design; intelligent welding; digital installation

引言

钢闸门是水利水电工程中用于调节水流、防洪排涝的关键设备,广泛应用于溢洪道、泄洪洞、船闸等核心部位。据统计,我国水工金属结构失效案例中,钢闸门系统占比达62%,其中材料劣化、焊接缺陷及安装误差为主要诱因。随着水利水电工程向高水头、大流量方向发展,钢闸门需承受更高水压(达150m级)、更强动水冲击(流速超40m/s)及更严苛的腐蚀环境(年腐蚀速率0.3mm以上)。本文立足钢闸门技术特性,系统探讨其制造与安装过程中的关键技术,为工程实践提供理论参考。

1 水利工程钢闸门功能特性

水利工程钢闸门需长期服役于高水压、强冲刷、动载荷交替作用的复杂环境,其设计需全面适配以下极端工况:

(1) 高水压承载。以百米级水头工况为例,闸门面板承受静水压力可达 $P = \gamma H = 9.8 \times 10^3 \text{ kPa}$ (γ 为水容重, H 为设计水头), 边缘局部应力超200MPa。为此主体结构普遍采用Q690D级高强度钢, 其

屈服强度与板厚匹配关系满足 $\sigma_{\max} \leq 0.7ReH$, 确保结构安全储备。(2) 动水启闭动力学。在流速 $v > 20\text{m/s}$ 的泄洪工况下, 闸门启闭需克服动水阻力, $F_d = C_d \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 A$ (C_d 为阻力系数, ρ 为水密度, A 为迎流面积)。实测表明, 此时启闭力波动幅度超设计值30%, 需通过流线型门体优化与液阻阻尼装置将振动加速度控制在0.5g以内。(3) 耐磨蚀性能。多沙河流中, 泥沙颗粒以30度冲蚀角持续撞击面板, 年磨损量 $W = K v^{2.5} d^{1.5} t$ 估算 ($K = 8 \times 10^{-7}$, d 为泥沙中值粒径)。采用激光熔覆Stellite6合金涂层(硬度62HRC)后, 磨损速率可降至0.8mm/年, 满足20年设计寿命。(4) 密封可靠性。止水系统需在0.3MPa压差下实现零渗漏, 通过有限元优化接触应力分布, 确保密封面压强 $p \geq 1.5\text{MPa}$ 。经 10^4 次启闭循环试验后, P型橡胶止水带压缩永久变形率仍 $\leq 15\%$ 。

2 钢闸门制造关键技术

2.1 抗动载结构设计与优化

钢闸门在动水工况下的结构安全性需通过精细化设计保障。采用计算流体力学(CFD)技术对闸门启闭全过程进行流体-结构耦合仿真,可精准模拟水流速度场、压力场及空化效应分布。基于仿真结果,对门体轮廓进行流线型优化,例如将门槽转角半径增大至300mm以上,底缘采用椭圆弧过渡,以降低局部流速梯度。针对空化高风险区域(如门槽倒角、底缘迎水面),增设导流板或表面硬化层,使临界空化流速提升40%以上。主梁作为核心承力构件,采用变截面箱型结构设计,其腹板高度依据弯矩图呈线性递减,既保证抗弯刚度又避免材料冗余。面板区域设置双向加劲肋,通过有限元分析确定最优间距(300~500mm),形成网格状支撑体系,有效抑制局部屈曲变形,实测显示可提升面板临界应力值25%。

2.2 高性能材料应用

材料性能直接决定钢闸门的环境适应性与服役寿命。对于高水头工程(H>50m),主体结构选用Q420/Q460低合金高强度钢,其屈服比控制在0.85以下,兼顾强度储备与加工塑性。耐磨区域(如闸门底缘、导流板)采用堆焊D507Mo耐磨焊条工艺,通过多层多道焊接形成硬度≥HRC50的耐磨层,实测在含沙水流中磨损量较普通钢材降低70%。止水系统创新采用P型聚氨酯止水带,通过分子结构设计使压缩永久变形率≤15%(23℃×72h),并添加石墨填料将摩擦系数降至0.15以下。水封接触面应用激光熔覆技术制备Stellite合金涂层,该涂层兼具高硬度(≥HRC60)与低摩擦特性,经10⁴次摩擦试验后磨损量仅0.03mm,显著延长止水系统更换周期。

2.3 精密制造工艺

制造精度是保障闸门运行平稳性的关键。面板加工采用五轴联动加工中心,通过一次装夹完成铣削、钻孔、坡口制备等多道工序,使平面度控制在0.5mm/m以内,边缘直线度偏差≤0.3mm。支铰轴孔作为核心配合部位,采用珩磨工艺分粗珩、精珩两阶段加工,配合在线检测系统将圆柱度误差控制在0.02mm以内,确保启闭机运行无卡滞。针对焊接变形控制,开发“分段跳焊+随焊锤击”复合工艺:将长焊缝划分为200mm段间隔施焊,每段焊接后立即用风动锤击焊缝两侧各3击,使残余应力峰值降低40%。焊缝质量检测引入相控阵超声检测(PAUT)技术,通过电子扫描实现B/C/D扫描成像,可精准识别≥φ2mm的缺陷,检测效率较传统超声提升3倍。

2.4 梯度防腐体系构建

针对不同区域的腐蚀环境,构建“三区五层”梯度防腐体系。水上区采用环氧富锌底漆(≥80 μm)+环氧云铁中间漆(≥100 μm)+氟碳面漆(≥80 μm)复合涂层,其中富锌底漆提供阴极保护,云铁中间漆增强屏蔽性能,氟碳面漆确保耐候性,实测耐盐雾试验达3000h无锈蚀。水下区实施热喷涂锌铝合金(≥200 μm)+环氧封闭漆(≥50 μm)方案,热喷涂层孔隙率≤1%,配合封闭漆形成致密防护层,电化学阻抗谱测试显示防护效能衰减率≤5%/年。水位变动区采用牺牲阳极保护,按0.2kg/m²密度布置铝合金

阳极块,通过定期检测电位变化(保护电位-0.85~-1.15V)确保阴极保护有效性,单块阳极设计寿命≥5年。

3 钢闸门安装技术

3.1 施工准备与基础验收

3.1.1 埋件检查与处理。埋件安装质量直接影响闸门运行精度,需进行三维空间精度控制:(1)轨道安装。采用“先底槛后侧轨”的顺序,通过高精度全站仪(测角精度±1",测距精度±1mm+1ppm)控制中心线偏差≤1mm。侧轨工作面平面度通过激光准直仪检测,每2米段差值≤0.5mm。(2)底槛安装。作为门体就位基准,其水平度偏差需控制在0.3mm/m以内。采用预应力锚固技术,在混凝土浇筑前对底槛施加设计荷载的60%进行预压,消除混凝土收缩变形影响。(3)支铰座安装。弧形闸门支铰轴承座需通过激光跟踪仪校核,确保两支铰中心连线与理论轴线偏差≤0.2mm。采用低温装配工艺,将轴承座加热至120℃后快速就位,冷却后过盈量控制在0.05~0.10mm。

3.1.2 混凝土基础验收。强度检测:采用回弹法与钻芯法相结合的方式,当设计强度C30时,实测值需≥22.5MPa(75%设计值)。重点检测门槽、支铰基础等应力集中区域,钻芯数量不少于3组。

几何尺寸复核:门槽断面尺寸偏差≤5mm,垂直度≤1mm/m。对于复杂结构(如多级消能工闸室),采用三维激光扫描仪生成点云模型,与BIM设计模型对比误差≤10mm。

表面处理:埋件接触面需进行喷丸处理,粗糙度达到Sa2.5级。清除浮浆、油污后,涂刷环氧腻子找平,确保埋件与混凝土接触率≥85%。

3.1.3 设备复核与试运转。闸门几何检测:在专用检测平台上,使用龙门式三坐标测量机(精度±0.02mm)复测门叶外形尺寸,对角线偏差≤3mm。重点检查止水座板平面度(≤0.5mm/m)和支铰孔同轴度(≤0.1mm)。

启闭机性能试验:在制造厂进行空载、动载、超载试验,行程测量采用光栅尺(分辨率0.01mm),容量校核通过液压加载系统实现,误差≤5%。

3.2 安装工艺流程

3.2.1 埋件安装工艺。底槛安装:采用“预埋钢板+调整螺栓”工艺,通过精密水准仪(精度±0.4mm/km)控制高程偏差≤1mm。底槛与侧轨连接处预留2mm焊接收缩量,采用对称分段退焊法,将变形量控制在0.5mm以内。

侧轨安装:分节制造的侧轨在现场拼接时,采用激光对中系统确保接缝错位≤0.1mm。通过可调支撑架实现三维调整,最终固定前进行二次灌浆,灌浆料流动度≥320mm,28天抗压强度≥60MPa。

支铰座安装:对于大型弧形闸门,支铰轴采用“冷装+热装”复合工艺:先将轴颈冷却至-80℃,快速就位后加热轴承座至200℃,通过红外测温仪监控温度场,确保过盈配合质量。

3.2.2 闸门吊装技术。吊装方案编制:根据闸门重量(50~500t)、外形尺寸及现场条件,选择液压提升装置或门式起重机。

对于超重闸门,采用计算机同步控制系统,实现8个吊点位移同步误差 $\leq 2\text{mm}$ 。

就位调整工艺:门体落床后,使用六自由度液压调整装置进行精调,通过电子水平仪(精度 0.01mm/m)控制水平度偏差 $\leq 0.5\text{mm/m}$ 。对于人字闸门,需通过激光跟踪仪检测门轴柱垂直度,调整量通过PLC控制系统自动补偿。

临时固定措施:在二期混凝土浇筑期间,采用“型钢支架+千斤顶”组合支撑体系,每平方米布置不少于4个支撑点,确保门体在混凝土侧压力作用下位移 $\leq 1\text{mm}$ 。

3.2.3止水安装工艺。止水橡皮加工:采用数控切割机下料,接头处加工 45° 斜面,使用专用粘接剂在 60°C 恒温箱内固化24小时。压缩量通过预压试验确定,P型橡皮控制在 $2\sim 4\text{mm}$,L型橡皮控制在 $1\sim 2\text{mm}$ 。

止水座板处理:表面粗糙度达到 $\text{Ra}3.2\mu\text{m}$,与橡皮接触面涂刷水性润滑剂,摩擦系数 ≤ 0.15 。压板螺栓采用扭矩法紧固,扭矩值通过螺栓伸长量校核,误差 $\leq 5\%$ 。

接缝防水处理:止水搭接长度 $\geq 200\text{mm}$,转角处加工 $R=50\text{mm}$ 圆角。对于水下止水,采用双组分聚硫密封胶嵌缝,胶体与混凝土粘结强度 $\geq 1.5\text{MPa}$ 。

3.3安装质量控制

3.3.1无水调试试验。手动启闭试验:在闸门全行程范围内往复运动3次,检查运行平稳性、制动可靠性及限位准确性。重点检测启闭机与闸门连接螺栓的预紧力,采用超声波螺栓测力仪(精度 $\pm 3\%$)进行复核。

启闭力测试:通过液压加载系统模拟水压力,实测启闭力与设计值偏差 $\leq 10\%$ 。对于不平衡力较大的弧形闸门,采用双测力传感器对称布置,消除侧向力干扰。

止水效果检测:在门体顶部施加 0.1MPa 气压,通过肥皂水喷涂法检查泄漏点,要求连续 5min 无气泡产生。

3.3.2静水启闭试验。水位差控制:按设计水头的25%、50%、75%、100%分级加载,每级持荷时间 $\geq 30\text{min}$ 。水位差 $\leq 5\text{m}$ 时,闸门启闭时间偏差 $\leq 5\text{s}$,行程开关动作偏差 $\leq 10\text{mm}$ 。

渗漏量测定:采用容积法测量,在闸门下游设置标准量水堰,渗漏量 $\leq 0.1\text{L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ 。对于大型闸门,采用分布式光纤测漏系统,实现渗漏点精确定位。

结构应变监测:在主梁、面板等关键部位布设光纤光栅传感器,采样频率 1kHz ,应变测量精度 $\pm 1\mu\epsilon$ 。通过与理论计算值对比,评估结构安全性。

3.3.3动水启闭试验。流速模拟:通过调节闸门开度,在门槽区形成设计流速($5\sim 40\text{m/s}$)。采用ADCP(声学多普勒流速仪)进行三维流速测量,误差 $\leq 2\%$ 。

振动特性分析:在门体、支铰等部位布置加速度传感器,测试频率范围 $0\sim 200\text{Hz}$ 。要求一阶固有频率避开水流脉动主频,振幅 $\leq 0.2\text{mm}$ 。

空化观测:采用气泡成像系统(BIV)检测门槽、底缘等区域

空化强度,空化数 $\sigma \leq 0.2$ 时需采取补气措施。

3.4数字化安装技术

3.4.1三维扫描建模技术。三维扫描建模技术通过高精度数据采集与智能分析实现钢闸门埋件精准安装:采用FARO Focus3D激光扫描仪(精度 $\pm 2\text{mm}$)对门槽、埋件进行全尺寸扫描,获取点云密度 $\geq 50\text{点}/\text{cm}^2$ 的原始数据;实测点云与BIM设计模型在Geomagic Control软件中配准,生成色差热力图直观显示偏差分布,重点部位如支铰座安装面误差控制在 $\leq 1\text{mm}$ 以内;基于实测数据构建有限元分析模型,模拟二期混凝土浇筑工况下的埋件变形规律,通过迭代优化螺栓预紧力布置方案,将实际变形量精准控制在 0.3mm 设计阈值内,显著提升大型钢结构安装质量。

3.4.2智能监控系统。智能监控系统通过多技术融合实现钢闸门安装全周期智能管控:在闸门、启闭机及埋件关键部位部署高密度传感器网络,集成倾角传感器、位移计、应力计等监测终端,以 100Hz 采样频率采集结构响应数据,经LoRaWAN无线传输至云端分析平台;基于机器学习算法构建健康诊断模型,通过历史数据训练实现止水渗漏、结构变形等故障的早期特征识别,预警准确率突破 90% ;数字孪生平台深度耦合BIM模型、实时监测数据与有限元分析引擎,借助Unity 3D引擎实现安装过程的三维可视化模拟,支持多方案虚拟比选与设备联动调试,显著提升施工决策效率与质量管控精度。

3.4.3 BIM技术应用。在钢闸门安装过程中,BIM技术通过三维模型集成与数据驱动管理实现了全流程优化:基于Navisworks平台整合闸门、起重机械及埋件等BIM模型,开展空间碰撞检测提前识别 42 处潜在干涉点,为施工方案优化提供可视化依据;通过4D施工模拟(三维模型+时间维度)构建动态资源调度系统,根据工序衔接需求实时调配人员与设备投入,使窝工时间缩减 30% ;建立全生命周期质量追溯体系,将埋件加工精度、焊接参数、无损检测报告等关键数据与BIM模型构件深度关联,形成可追溯的数字化质量档案,实现制造-运输-安装各环节质量信息的穿透式管理。

4 结束语

钢闸门制造与安装技术需深度融合材料科学、流体力学、智能控制等多学科成果。通过抗动载结构优化、高性能材料应用、精密制造工艺及智能安装技术,可显著提升钢闸门在复杂水利环境中的适应性与可靠性。未来,随着数字孪生技术与增材制造的发展,钢闸门将向自适应、轻量化、长寿命方向演进,为水利工程安全运行提供更强技术保障。

[参考文献]

- [1]SL 74-2019,水利水电工程钢闸门设计规范[S].
- [2]SL 105-2007,水工金属结构防腐蚀规范[S].
- [3]GB/T 700-2006,碳素结构钢[S].

作者简介:

姜军杰(1991--),男,汉族,河南鄢陵人,大学本科,工程师,研究方向为水利工程建设管理。