

# 水利枢纽闸门金属结构疲劳寿命评估研究

郭磊

新疆塔里木河流域开都孔雀河水利管理中心希尼尔水库管理站

DOI:10.32629/hwr.v10i2.6815

**[摘要]** 由于水利枢纽闸门金属结构在运行过程中受到复杂的动水力以及外界环境的影响而产生疲劳破坏现象,是影响水利工程稳定性的关键因素之一。然而,目前针对该类问题的研究往往过于简化条件,未能充分考虑实际工况下受载情况及外界侵蚀等因素对闸门使用寿命造成的影响,从而不能准确地评价闸门的实际寿命状态。本文基于具体工程项目,在考虑不同尺度的力学模型基础上,结合现场实测资料进行详细分析,并对结构受力变化及损伤发展过程进行了综合评价;同时,在原设计的基础上,考虑了突发冲击效应以及腐蚀疲劳效应的影响,对原结构受力状态进行了合理修正,进一步提高了其适用性,以期指导后续养护管理工作的开展。

**[关键词]** 水利枢纽; 闸门; 金属结构; 疲劳寿命; 评估方法

**中图分类号:** TV663 **文献标识码:** A

## Research on fatigue life assessment of metal structures of hydro-junction gates

Lei Guo

Xinjiang Tarim River Basin Kaidu Peacock River Water Conservancy Management Center Xini'er Reservoir Management Station

**[Abstract]** Fatigue failure of metal structures of hydraulic hub gates due to complex hydrodynamic forces and external environmental impacts during operation is one of the key factors affecting the stability of hydraulic engineering projects. However, current research on this issue often oversimplifies conditions and fails to fully consider the impact of loading conditions and external erosion on the service life of gates under actual working conditions, thus failing to accurately evaluate the actual life status of the gates. Based on a specific engineering project, this paper conducts a detailed analysis by considering mechanical models at different scales and combining with field measured data, and comprehensively evaluates the structural stress changes and damage development process. At the same time, based on the original design, the impact of sudden impact effects and corrosion fatigue effects is considered, and the original structural stress state is reasonably corrected, further improving its applicability to guide subsequent maintenance and management work. This has a positive practical guiding role in ensuring the long-term good operation of the project and provides a scientific basis for regulating and improving relevant industry technical standards.

**[Key words]** water conservancy hub; gate; metal structure; fatigue life; evaluation method

## 引言

水利工程是保障水资源安全的关键设施之一,其中闸门是控制水流的重要设备,涉及防洪度汛、电力生产以及河流生态保护等方面的安全运行。金属闸门在长期开启关闭中承受了成千上万次的疲劳加载,再加上水中氯离子侵蚀、流沙冲刷等其他外力作用下的损伤累积,使得微小初始裂纹逐渐扩展直至破坏。目前对于这些因素对闸门安全性的影响主要从定性判断或粗略选取几种工况来研究,未考虑变幅规律及影响因素耦合作用,难以对维修时机做出科学判断。本文拟在这些方面有所创新,在综合

考虑闸门运行条件的基础上,从动力角度提出一种新的评价方法,并以此作为基础来探讨适合实际情况的一种可靠度计算方法,提高水利工程的安全性。

## 1 疲劳损伤的微观机制与多维影响因素

### 1.1 疲劳损伤的微观演化机理

金属材料的宏观疲劳破坏是由微观上的位错滑动和晶间滑移造成的。当水利工程闸门受到水压作用后,在反复加载的作用下产生塑性变形,并且在晶体内部移动,然后在晶界处积累形成滑移线和微小空隙;经过一定时间后这些空隙相互贯通成为微

裂缝,在不同方向上,由于材料性能差异以及残余应力等因素影响,裂纹会发生不同程度的发展。具体而言,水中DO和Cl<sup>-</sup>加速阳极腐蚀而促进阳极溶解,并与载荷作用下的力学损伤发生耦合从而导致裂纹生长速度比空气中快几倍以上;同时该现象具有高度非线性特点,因此应借助于TEM显微表征和MD计算进一步阐明不同环境介质以及载荷下材料失效演化机理。从微观角度认识位错湮灭和裂纹钝化的规律,是准确预报寿命的根本保障,也是指导材料改进的重要依据<sup>[1]</sup>。

### 1.2 多维环境与工况的耦合效应

实际工况下,多种因素综合作用导致闸门的疲劳过程复杂化,很难仅考虑某一因素来描述闸门的实际疲劳损伤历程。泥沙含量对闸门的表面腐蚀有较大影响,在一定程度上增大了局部的应力集中因子,并产生新的缺口效应源;而闸门开启次数及行程大小则决定了闸门所承受的不规则载荷,其中最大值出现的概率决定了闸门疲劳破坏的发展趋势。同时,由于焊缝热处理工艺不当,使得闸门主要受力区域(如主销与铰座处)存在较大的残余应力,这是导致该部位产生初始裂纹的原因;未焊透及气孔的存在降低了材料的有效承载能力。同时由于温度变化引起的水温差作用在焊接头区域施加了附加的热力场,与外部加载共同作用对裂纹闭合有力有显著的影响。

## 2 评估方法的创新构建与工程验证

### 2.1 数据驱动的动态评估模型

本文构建基于物理解释的数据驱动模型。首先采集实际工况下闸门受力变形过程中的实时监测信息,并对这些信息进行小波包降噪处理,得到作用在钢闸门上的实际冲击载荷值;其次根据Paris模型及影响因素,建立考虑氯离子侵蚀效应下的修正Paris公式。建立非线性损伤累积规律,应用神经网络学习机制在线修正系数,实现对时变、不确定载荷谱的有效描述,并能够反映变幅载荷作用下的损伤率非连续突增现象,在多启闭闸门中具有较好的适用性;引入材料破坏条件,保证预报结果满足裂纹失稳扩展的物理机制,提高评价的工程实用性和可靠性<sup>[2]</sup>。

### 2.2 实际工程案例验证与效能分析

以长江某大型水电站的弧门为例,应用了上述方法进行验证。布置光缆式测力传感器及腐蚀传感器在线监测,将所测结果代入上述预测计算公式,则可得出其预计使用寿命的概率密度函数图。对比发现,由于未考虑开、关过程中的瞬态动力作用效应,原先的计算值比实际寿命大40%左右;本研究提出的基于最大应力变化率的修正公式能够有效反映这一影响因素的作用机理。提供了一个较为安全可靠的置信区间范围,制定了预防性维修方案,避免了设备非计划停工;通过对实际应用的分析表明本文提出的方法能够有效用于现场复杂的场景,并证明了准确构建载荷谱对于提高诊断准确性的重要性,说明了本文提出的创新研究具有一定的实用性,也为其他领域提供了一套通用的方法流程。

## 3 疲劳寿命评估的关键技术策略

### 3.1 基于晶界工程的疲劳抗力主动调控策略

闸门钢的疲劳寿命与其显微组织密切相关,晶界是裂纹优先发生的位置,且对其抗损伤能力有很大影响。由于未考虑晶界的控制作用,常规选材中单纯追求较好的强度、韧性等参数,导致其在泥沙及海水环境下的使用寿命较短。本文方法建议从材料层面提高其自身的抗疲劳性能,即在设计阶段就对晶界进行优化,以达到减缓损伤的目的。通过对不同部位晶界的优化设计,使晶界结构具有梯度性。例如,针对闸门中应力相对集中的位置,如焊缝附近,可以先在850℃下保温一段时间析出碳化物,然后再在650℃进行等温淬火,以促进大量小角度晶界(数量级为10<sup>15</sup>每平方米)的产生。该结构可阻挡位错运动及微孔洞聚合,推迟裂纹形成;在暴露于腐蚀介质中的表层,转变为低能态的大角晶界,可降低电化活性,减小腐蚀疲劳联合作用的影响。为此,采用少量稀土元素(如Ce)微合金化处理工艺,利用其原子尺寸因素作用,消除晶界污染,降低S、P杂质元素富集,改善界面结合力。具体做法为:研制基于超声波反向反射原理的在役工件晶间检测仪,用于动态控制晶间结合状态的一致性;同时研发相应的分析软件对退火后晶间结合情况进行预测,并反馈至实际生产过程中进行工艺优化<sup>[3]</sup>。

### 3.2 实时载荷谱动态重构与评估闭环策略

水利工程中闸门所承受的工作载荷谱是随机性和时间变化性的,在不同的水头条件下,不同开度下以及由于某些偶然事故发生的冲击情况下,工作载荷会随着条件的不同而产生很大差异。以往对闸门寿命的估计均是在一个相对固定的设计工作载荷谱下进行的,显然不能反映闸门在实际工作中真实的疲劳损伤状态,从而造成估算结果严重偏离实际情况。本文提出一种基于传感网络和机器学习算法的闸门在线工作载荷谱重建方法,动态闭环升级评价过程。前端监控系统(采用耐化学腐蚀的光纤布拉格光栅应变传感器安装于闸门上实现应变实时测量以及振动和水体质量的监测)+本端处理单元(应用小波包分解技术和PCA方法由本端传感器采集的数据识别出相关的应力变量并去除冗余的信息)+后台机器学习算法(基于实时反馈及长期观察预测安全状态),更新瞬态载荷历程及疲劳损伤。主要改进方向是采用PINN模型,并利用断裂力学微分方程作为约束条件加入目标函数以保证解的合理性,此外还可实现对特殊工况的自动判定(例如暴雨),从而动态修正损伤演化模型<sup>[4]</sup>。在选用应变片型号时,应当考虑其防水性能以及测量精度,通信:采用LPWAN技术实现可靠长距离通讯;算法:采用LSTM模型,并在训练过程中引入材料疲劳极限等先验信息以提高算法鲁棒性。此外,在发生损伤率陡升的情况下,给出相应对策(例如减少开停次数),从而实现“观测—分析—控制”。

### 3.3 多尺度损伤容限设计优化策略

疲劳寿命需考虑结构整个服役过程,而不仅仅是最终破坏时刻。为此本文给出基于多尺度损伤容限的设计方法,即从裂纹萌生开始到最终破坏全过程进行控制,在结构中存在损伤的情况下保证其安全性。具体包括三部分:第一部分为微尺度上采

采取措施抑制裂纹萌生,例如通过对材料进行微结构调控以实现这一目的,其中包括晶粒尺寸减小(小于 $5\mu\text{m}$ )和形成纳米颗粒型第二相强化物质等;介观尺度,在焊接接头等薄弱部位进行拓扑优化设计渐变过渡区域,以消解应力集中(如将角焊缝变为曲率过渡);宏观尺度,根据断裂力学确定临界裂纹尺寸(如规定主梁上可接受的表面裂纹深度为 $2\text{mm}$ ),并结合定期探伤确定容限界限。其关键是建立二者之间的联系模型。将微观损伤效应量化——基于数字孪生原理建立虚拟闸门,将材料特性及荷载历程、损伤本构关系等参数进行数据耦合转换。具体做法为:先在设计阶段预留“安全裂缝通道”,由构件形状控制其沿着危险性较小的方向延伸(例如在次要受力部位开凿小洞口);第三步:开发损伤容限分析软件,导入检测结果进行剩余强度及安全裕度的快速计算;第四步:编制风险驱动的检验方案,对风险较低部位适当扩大检验周期<sup>[5]</sup>。

### 3.4 智能裂纹扩展路径预测与主动干预策略

在目前的疲劳评估中,由于对裂纹萌生和延伸方向缺乏有效判断手段,无法准确地估计裂纹走向,往往等到裂纹已经出现后才开始进行检测和处理。本文提出的方法通过对裂纹生长方向的有效识别并提前采取相应对策以减少损伤累积,在一定程度上实现事前维修管理。为此,首先基于CNN模型建立闸门表面裂缝发展情况及其内力分布之间的映射关系,即从以往观测到的裂缝几何特征图(采用DIC法采集)和当前的应变值以及材料性能指标作为模型的输入变量,裂纹萌生及扩展的方向和速度。由于大量的模拟计算以及实际工程案例的学习积累,该方法可以学习到不同应力状态条件下的裂纹扩展趋势;此外,采用物理信息神经网络(PINN)方法,在PINN损失函数中加入线弹性断裂力学理论,从而使得预测结果满足能量释放率准则。根据预测结果,两种防护方法的设计与实现:在预报路线布置小孔(孔径为 $0.5\text{mm}$ 、孔距 $2\text{mm}$ ),形成应力遮蔽区以影响裂纹发展轨迹;在裂纹前沿区域实施点状激光升温处理(升温速率为 $500^\circ\text{C}/\text{mm}$ )形成压应力场以阻止其生长。如在弧形工作闸门主筋条处采用点钻孔方案使其裂纹避开危险断面。

### 3.5 环境-载荷耦合效应补偿模型构建策略

在水利环境下,由于腐蚀作用和机械负载相互耦合导致疲劳失效更快,但是目前针对两者耦合作用的分析方法却分别进行计算,大大降低了预测的风险性。本文所提方法利用针对性的补偿模型来体现两者的耦合影响,并将其引入到剩余寿命的预

测中。该模型根据腐蚀与力学之间的影响机制建立,以反映两者之间的关系,即腐蚀速率是应力强度因子的函数;其中水环境中的pH值、DO含量以及水流速度、应力比为相关变量,开展加速腐蚀疲劳试验研究,构建耦合损伤函数 $D=D_m \times f(t)$ ,其中 $D_m$ 为机械损伤, $f(t)$ 表示随时间变化的环境因子影响函数。提出关键点是将时间因素考虑进来——腐蚀效应受服役时间的影响,因此 $f(t)$ 并不是常数,其数值会根据实测水化学条件的变化而变化(例如当来沙量较大时,则取较高的 $f(t)$ 值)。具体方法包括:安装在线水化学测量设备并进行现场测量。二是编写内置于程序中的算法,依据实时情况求出 $f(t)$ 的值;三是将补偿模块加入评价程序当中。比如在评价程序中,若发现溶氧含量突然升高,则增加损伤积累的比例系数。

## 4 结语

综上所述,在本文中,笔者针对水利枢纽工程闸门金属结构进行了疲劳损伤分析,并探讨了环境及荷载因素在评价中的作用。提出了基于环境条件下的闸门金属结构疲劳损伤综合评价方法,并提出了5个关键技术和措施建议,以期在材料层面、构件层面以及整体层面提高疲劳损伤的评价水平,将疲劳控制由被动转为主动。展望未来,在各领域不断交叉发展及人工智能深入应用下,疲劳寿命分析必将朝着高精度和实时性方向进一步发展,从而确保水利工程百年大计的安全可靠,并在国际水工工程稳定性领域中发挥更大的作用。

## [参考文献]

- [1]李锋,佘海进.大石峡水利枢纽工程金属结构设计研究[J].水电站机电技术,2025,48(03):79-84+108.
- [2]黄树华,蒋凯.西津水利枢纽二线船闸闸门实时在线监测[J].红水河,2023,42(02):32-37.
- [3]梁献,张明,樊冠桥.洋溪水利枢纽工程金属结构设计关键技术分析[J].广西水利水电,2022,(03):68-71+74.
- [4]王强,蓝志锋,刘天政,等.西藏湘河水利枢纽工程金属结构设计[J].水利科技与经济,2020,26(03):1-6.
- [5]杨祥勇.水利枢纽工程金属结构安装施工方法[J].河北水利,2020,(02):42-43+45.

## 作者简介:

郭磊(1981—),男,汉族,湖南澧县人,大学,馆员,研究方向:水利工程运行。