

水利枢纽闸门与压力钢管病害诊断及综合防护技术

李佳宁

河北省水利工程局集团有限公司机械厂 河北 石家庄 050000

摘要:水利枢纽中闸门与压力钢管病害由环境、荷载、材料共同作用形成,常见磨损、腐蚀、裂纹、变形等病害。诊断技术包括外观、无损及性能参数检测。防护技术涵盖材料优化、表面防护、结构加固等方面。运维方面,需建立定期检测与监测机制,重点关注病害高发部位;加强日常清洁维护,减少病害诱发因素;及时修复破损防护层,保障防护效果,确保闸门与压力钢管安全稳定运行。

关键词:水利枢纽;闸门;压力钢管;病害诊断;综合防护技术

引言:水利枢纽中,闸门与压力钢管作为关键结构,长期面临复杂环境与荷载作用,易出现多种病害,影响工程安全与运行效率。准确诊断病害类型、成因,并采取有效防护与运维技术,是保障水利枢纽稳定运行的关键。本文围绕闸门与压力钢管,从病害类型与成因、诊断技术、综合防护技术以及防护运维技术等方面展开深入探讨,旨在为相关工程提供全面的技术参考,提升水利枢纽的安全性与可靠性。

1 闸门与压力钢管常见病害类型及成因

水利枢纽中的闸门与压力钢管长期处于复杂的工作环境中,其病害的形成是环境因素、荷载作用以及材料特性共同交织影响的结果。不同病害类型的成因呈现出显著的差异,主要可归结为以下几类核心病害:(1)磨损病害是较为常见的一种。它主要源于水流中携带的泥沙颗粒对结构表面的持续冲击与切削。在水流流速较大、泥沙含量较高且颗粒硬度较大的情况下,磨损程度会愈发严重。这种病害常见于闸门门叶的迎水面、门槽部位,以及压力钢管的进水口和弯管段等水流紊动极为剧烈的区域。(2)腐蚀病害堪称最为普遍的病害类型。依据其腐蚀机理,可细分为电化学腐蚀、化学腐蚀和生物腐蚀。电化学腐蚀通常是由于水体中的电解质与结构金属材料形成了原电池,进而引发金属的溶解和破坏;化学腐蚀则是金属与水体中的酸性、碱性物质直接发生化学反应所导致;生物腐蚀则源于微生物的代谢产物对材料的侵蚀,或者微生物附着在材料表面引发的局部腐蚀。(3)裂纹病害主要由荷载应力集中和材料疲劳所引发。当结构所承受的荷载超过了材料的许用应力,或者长期承受周期性的交变荷载时,材料内部的微观缺陷会逐渐扩展,最终形成宏观可见的裂纹。这种病害常见于闸门的主梁、支臂,以及压力钢管的焊缝和开孔部位。(4)变形病害多由荷载失衡、温度变化或者结构约束不

当所导致。当水压力、温度应力等超出了结构的刚度承载范围,或者由于结构安装偏差导致受力不均匀时,就容易出现门叶翘曲、钢管椭圆度超标等变形问题^[1]。

2 闸门与压力钢管病害诊断技术

2.1 外观检测技术

外观检测作为闸门与压力钢管病害初步诊断的基础性方法,在工程实践中发挥着重要作用。它主要借助目视观察、尺量测量以及辅助工具检测等手段,实现对结构表面病害的精准识别与详细记录。(1)对于闸门,检测工作重点聚焦于门叶表面、焊缝、门槽以及止水装置等关键部位。通过细致观察,判断是否存在锈蚀、磨损、裂纹、变形等状况,同时查看止水装置有无老化破损。在检测过程中,运用钢板尺、游标卡尺等工具,精确测量磨损深度、变形量以及裂纹长度等关键参数。(2)针对压力钢管,检测重点放在管内壁、焊缝、管节接口、弯头及支座部位。检测人员可通过肉眼或借助内窥镜,清晰观察腐蚀斑点、磨损痕迹以及裂纹的开展情况。并且利用激光测距仪、超声波测厚仪等专业工具,准确测量钢管壁厚减薄量、椭圆度以及接口错边量。外观检测操作简便、成本低廉,能快速对大面积结构进行排查,为后续精准诊断提供病害分布和初步特征信息。

2.2 无损检测技术

无损检测技术是实现内部病害精准诊断的核心手段,可在不破坏结构完整性的前提下,检测结构内部的隐蔽性缺陷。常用技术包括超声波检测、射线检测、磁粉检测、渗透检测及涡流检测等。(1)超声波检测通过发射超声波穿透结构材料,依据反射波信号判断内部缺陷的位置、大小及形态,适用于检测闸门主梁、压力钢管焊缝内部的裂纹、未焊透、夹渣等缺陷,具有检测深度大、精度高的优势;(2)射线检测利用射线穿透材料后的衰减特性形成影像,直观呈现结构内部缺陷的形态

与分布,适用于检测厚度较大的压力钢管本体及焊缝缺陷,检测结果直观可靠;(3)磁粉检测通过在结构表面施加磁场,利用缺陷处磁场畸变导致磁粉聚集的现象,识别表面及近表面的微小裂纹,适用于铁磁性材料的闸门与压力钢管表面缺陷检测;(4)渗透检测借助渗透液的毛细作用,使渗透液渗入表面微小裂纹,通过显像剂呈现裂纹痕迹,适用于各类金属材料表面开口裂纹的检测,不受材料磁性限制;(5)涡流检测利用电磁感应原理,通过检测涡流信号的变化识别材料表面及近表面的腐蚀、裂纹等缺陷,适用于导电金属材料的快速检测,尤其适用于压力钢管内壁的腐蚀检测^[2]。

2.3 性能参数检测技术

性能参数检测技术是通过精准测定结构关键性能指标,深入剖析病害对结构功能的影响程度,进而为病害等级的科学判定提供坚实量化依据的关键手段。(1)针对闸门,启闭力检测至关重要,借助高精度传感器,实时测量闸门启闭过程中驱动机构的输出力,以此判断是否存在因结构变形、摩擦增大等因素导致的启闭阻力异常状况。止水密封性检测采用注水试验或渗水观测法,精确测量止水装置的渗水量,全面评估止水性能的优劣。结构刚度检测则通过施加特定荷载,并精准测量结构变形量,准确判断结构是否因病害影响导致刚度下降。(2)对于压力钢管,耐压性能检测通过严谨的水压试验,测定钢管在设计压力及超压状态下的应力分布与变形情况,科学评估结构承载安全性。渗漏量检测通过精确计量钢管在压力状态下的渗水量,准确判断管体及接口的密封性能。结构振动检测利用先进的振动传感器,采集钢管运行过程中的振动信号,深入分析振动频率与幅值,精准判断是否因结构缺陷引发振动异常,为压力钢管的安全运行提供有力保障。

3 闸门与压力钢管综合防护技术

3.1 材料优化防护技术

材料优化是增强闸门与压力钢管抗病害能力的关键基础性举措,通过精心挑选耐蚀、耐磨且高强度的材料,或对既有材料实施改性处理,能从根源上大幅降低病害出现的可能性。(1)在材料选用环节,需依据不同工况精准抉择。对于腐蚀环境极为恶劣的区域,耐候钢凭借其在大气中生成的致密氧化膜,可有效阻挡腐蚀介质的侵入;不锈钢因含有铬等元素,具备出色的化学稳定性,能抵御多种腐蚀性物质的侵蚀;铝合金质量轻且耐蚀性佳,也是不错的选择;纤维增强复合材料等非金属材料,凭借独特的性能,可替代传统钢材应用于特定场景。针对磨损严重的部位,高强度耐磨钢具有较高的

硬度和耐磨性,能经受住长期磨损考验;在材料表面复合耐磨合金层,则能进一步提升其耐磨性能,延长部件使用寿命。(2)材料改性同样不容忽视。合金化处理通过添加铬、镍、钼等合金元素,可显著提升钢材的耐蚀性与耐磨性。热处理工艺则能优化材料的组织结构,使材料的强度与韧性得到增强,从而更好地抵抗荷载与环境作用。此外,在材料加工过程中,要严格把控加工精度,最大程度减少材料表面的划痕、凹坑等初始缺陷,防止这些缺陷成为病害萌发的起始点^[3]。

3.2 表面防护技术

表面防护技术通过在结构表面构建防护层,隔绝环境介质与结构材料的接触,阻断磨损与腐蚀的作用路径,是最常用的防护手段之一,主要包括涂层防护、金属喷涂防护及阴极保护等。(1)涂层防护通过涂刷或喷涂防腐、耐磨涂层在结构表面形成保护膜,常用涂层包括环氧树脂涂层、聚氨酯涂层、氟碳涂层等防腐涂层,以及陶瓷涂层、聚氨酯弹性体涂层等耐磨涂层,施工过程中需严格控制表面处理、涂层涂刷厚度及固化工艺,确保涂层与基体结合牢固、无针孔、气泡等缺陷;(2)金属喷涂防护通过热喷涂技术将锌、铝、不锈钢等金属材料喷涂在结构表面,形成致密的金属防护层,兼具防腐与耐磨性能,尤其适用于压力钢管内壁、闸门门叶等关键部位,喷涂后可进一步涂刷封闭涂层提升防护效果;(3)阴极保护技术通过施加外部电流或采用牺牲阳极,使结构金属处于阴极极化状态,抑制电化学腐蚀反应,适用于水下或潮湿环境中的闸门与压力钢管,常用牺牲阳极材料包括锌合金、铝合金等,外部电流阴极保护则适用于大型压力钢管等结构复杂、腐蚀环境严苛的场景。

3.3 结构加固技术

针对已出现裂纹、变形、强度下降等病害的闸门与压力钢管,需采用结构加固技术提升结构承载能力,遏制病害进一步发展。常用加固技术包括焊接加固、粘贴加固、外包加固及预应力加固等。(1)焊接加固通过在缺陷部位采用补焊、加焊加强板等方式增强结构强度,适用于闸门主梁裂纹、压力钢管焊缝缺陷等部位的加固,焊接过程中需控制焊接参数,避免产生新的焊接应力与缺陷;(2)粘贴加固利用结构胶将碳纤维布、玻璃纤维布或钢板粘贴在结构受拉区或缺陷部位,通过复合材料与基体材料的协同受力提升结构承载能力,具有施工简便、重量轻、强度高的优势,适用于闸门门叶、压力钢管管体等部位的加固;(3)外包加固通过在结构外部包裹钢筋混凝土、钢板等材料形成复合结构,增强结

构的刚度与承载能力,适用于压力钢管局部破损或刚度不足部位的加固;预应力加固通过施加预应力使结构产生与荷载作用方向相反的应力,抵消部分荷载应力,降低结构应力水平,适用于闸门主梁、压力钢管支座等受力集中部位的加固,可有效提升结构的抗疲劳性能。

4 闸门与压力钢管防护运维技术

4.1 定期检测与监测技术

定期检测与监测是及时发现病害、保障防护效果的关键运维措施。建立常态化的定期检测机制,依据结构服役环境与病害易发程度,制定合理的检测周期,采用外观检测与无损检测相结合的方式,对闸门与压力钢管的表面状态、内部缺陷、性能参数进行全面检测,形成检测档案,跟踪病害发展规律。针对关键部位或病害风险较高的结构,安装在线监测系统,实时监测结构的应力、变形、振动、渗水量及腐蚀状态等参数,通过数据采集与分析,实现病害的早期预警,为运维决策提供精准数据支撑。检测与监测过程中,需重点关注水流冲刷剧烈区、焊缝接头、止水装置等病害高发部位,确保检测覆盖全面、数据准确^[4]。

4.2 日常清洁与维护技术

日常清洁与维护可有效减少病害诱发因素,延长防护层使用寿命。定期清除闸门与压力钢管表面的泥沙、污垢、微生物附着体等杂物,避免杂物堆积导致局部腐蚀或磨损加剧,清洁方式可采用高压水枪冲洗、机械打磨等,对于结构表面的锈蚀斑点,需及时进行除锈处理并补涂防护涂层。加强对闸门启闭机构、止水装置的日常维护,定期检查启闭设备的润滑状态,及时添加润滑剂,确保启闭灵活;定期检查止水橡皮的磨损、老化情况,及时更换破损或老化的止水件,保障止水密封性。此外,需保持压力钢管内部水流通畅,避免因水流滞缓导致泥沙淤积或介质浓度升高,加剧腐蚀与磨损。

4.3 防护层修复技术

防护层在长期服役过程中易因磨损、老化、碰撞等因素出现破损,需及时进行修复处理,确保防护效果持

续有效。修复过程中,首先对破损部位进行表面处理,清除破损区域的锈蚀、油污、旧涂层等杂物,采用打磨、喷砂等方式提升表面粗糙度,增强新防护层与基体的结合力;然后根据原防护层类型选用匹配的修复材料,按照施工工艺要求进行涂层涂刷、金属喷涂等修复作业,确保修复层厚度均匀、致密;修复完成后,对修复部位进行质量检测,检查修复层是否存在针孔、气泡、剥离等缺陷,确保修复质量符合要求。对于阴极保护系统,需定期检查牺牲阳极的损耗情况或外部电流系统的运行状态,及时更换损耗严重的阳极或维修故障设备,保障阴极保护系统正常运行^[5]。

结束语

闸门与压力钢管作为水利枢纽的关键构件,其病害防治与运维管理关乎工程安全与长效运行。本文系统梳理了磨损、腐蚀、裂纹及变形等典型病害的成因机制,针对性提出了材料优化、表面防护、结构加固等综合防护技术体系,并构建了涵盖定期检测、日常维护及防护层修复的全周期运维策略。通过多技术协同与动态管理,可实现病害的精准识别、早期预警及科学处置,有效延缓结构劣化进程,提升抗风险能力。未来需进一步融合智能监测与新材料技术,推动防护运维向数字化、精细化方向发展,为水利设施安全运行提供更坚实的技术保障。

参考文献

- [1]曹国梁.超声波探伤技术在钢结构无损检测中的应用[J].黑龙江水利科技,2021,49(04):202-203.
- [2]周荣攀.水电站水库泥沙淤积对安全生产的影响及治理措施[J].水上安全,2024,(21):91-93.
- [3]汪良军.大型水利枢纽工程施工栈桥设计与施工[J].广西水利水电,2023,(05):98-100+122.
- [4]王京晶,杨丹妮,陈响.水利工程渠道运行管理与维护问题研究[J].水上安全,2025(3):16-18.
- [5]吕中东.水利工程渠道运行管理与维护的探讨[J].农业灾害研究,2025,15(4):229-231.