

水电工程金属结构设备防腐技术要求与验收标准探讨

文政 梁延民

中国水电建设集团十五工程局有限公司 陕西 西安 710075

【摘要】：水电工程金属结构设备长期处于潮湿、高流速、水化学成分复杂的环境中，易产生腐蚀损伤，影响运行安全与结构寿命。为确保可靠性与耐久性，需建立科学完善的防腐技术体系并与严格的验收标准相衔接。本研究围绕金属结构常见腐蚀机理、关键影响因素及典型防腐技术展开分析，重点探讨涂层体系、表面处理质量、施工工艺控制等对防腐效果的决定性作用。同时对现行验收标准进行比较研究，提出基于性能的综合评价思路，以实现防腐措施与验收要求的协调统一。研究旨在为水电工程金属结构设备的防腐设计、施工与质量控制提供可参照的技术路径。

【关键词】：水电工程；金属结构；防腐技术；验收标准；耐久性

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.056

引言

水电工程的金属结构设备在运行过程中持续暴露于水介质、压力脉动与复杂水化学环境中，腐蚀问题往往呈隐蔽性强、累积性大、危害突然等特点。无论是闸门、压力钢管，还是拦污栅等关键部件，其防腐水平直接影响运行安全系数与整体工程的服役寿命。随着大型水电工程向高水头、高流速方向发展，传统经验型防腐手段已难以满足严苛条件下的可靠性需求，技术与标准体系的同步提升显得尤为重要。围绕防腐技术要求与验收标准展开系统探讨，有助于揭示影响防腐效果的关键环节，并为构建更加精细化、量化的质量控制体系奠定基础。

1 水电工程金属结构腐蚀挑战的提出

水电工程中的金属结构设备在长期运行中经受水介质、压力波动及水化学成分变化等多重因素的共同影响，腐蚀问题呈现出隐蔽性强、累积损伤显著的特点。在高水头、高流速及水温变化频繁的运行条件下，钢材表面的电化学反应加速发生，局部腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀与应力腐蚀倾向不断增强。闸门、压力钢管、岔管及埋件等关键结构长期处于湿润状态，腐蚀介质渗透性强，对涂层体系和金属基体均形成持续侵蚀^[1]。随着水电站规模不断扩大及运行工况趋于复杂，传统经验型的防护措施难以完全覆盖材料退化的全过程，腐蚀问题呈现更高的不确定性，迫使工程管理者将防腐与耐久性视为不可忽视的核心技术环节。

在多变的水工环境中，金属结构暴露的腐蚀风险不仅来源于水体本身，还受到泥沙含量、水生物黏附以及水头差引起的渗透压力等因素的叠加影响。含沙水流会加剧涂层的磨蚀破坏，使保护体系在短时间内出现局部失效，继而形成腐蚀扩展通道。水体中的离子浓度变化亦会改变金属表面的电位分布，使腐蚀电流密度增大，导致腐蚀速率加快。部分工程区域长期处于交替干湿状态，如消能设施或检修频繁的结构表面，在氧浓差电池作用下极易引发加速腐蚀过程。与此同时，制造与安装环节若存在焊接应力残留、表面处理质量不足或结构缝隙未充分密封等情况，也将成为日后腐蚀扩展的重要诱因，使设备

性能在早期阶段便出现衰减趋势。

腐蚀带来的工程风险不止体现在材料本身的损伤，还可能诱发设备运行的不稳定性，使结构安全冗余降低。压力钢管内壁腐蚀可能导致壁厚减薄，承压能力下降；闸门表面腐蚀产物易引发启闭阻力变化，影响调度精度；埋件腐蚀削弱锚固能力，增大结构位移风险。随着腐蚀范围扩展，结构的局部薄弱部位会产生更大的应力集中，甚至触发疲劳破坏模式，使整体服役寿命明显缩短。工程运行期越长，腐蚀的不确定性越强，因此防腐技术要求在设计、施工、运行阶段必须高度重视腐蚀挑战的早期识别与过程控制，以便形成可持续的耐久体系，使金属结构在复杂水工环境中保持稳定性能。

2 腐蚀机理与环境因素的关键解析

水电工程金属结构在长期服役过程中受到电化学反应、水力作用和材料自身组织状态等多重因素影响，其腐蚀机理呈现复杂多元的特征。金属与水介质接触后，表层电化学反应会形成阳极与阴极区域，在溶解氧、氯离子及其他活性离子的作用下，腐蚀电流不断增大，使金属表面逐渐发生氧化并生成疏松腐蚀产物。水工结构中常见的点蚀与缝隙腐蚀多由局部电位差引起，一旦涂层存在微裂缝或基体暴露区域，腐蚀将沿着电化学弱点迅速扩展^[2]。压力钢管和闸门焊缝处因组织不均、残余应力集中，往往更易出现应力腐蚀开裂，使腐蚀机理与力学效应相互耦合，形成更具破坏性的退化模式。随着水流速度增加，金属表面受剪切力作用增强，涂层受磨损后暴露出新的阳极区，使腐蚀过程呈现动态持续性。

水工环境中的多变因素不断强化腐蚀条件，对腐蚀机理产生叠加影响。水体的酸碱度及溶解物质含量变化，会使电化学反应速率产生显著波动；高浓度氯离子会破坏金属表面的保护膜，使局部腐蚀呈现突发性和进展性；含砂水流造成的磨蚀作用会加速涂层脱落，使原本稳定的钝化膜被破坏并重新进入活化状态。在坝前、泄洪区或调压井等区域，金属表面经常处于气水交互作用中，氧浓差电池现象明显，极易形成差异腐蚀。部分结构区域受太阳辐射及温度循环影响，膨胀—收缩效应使

涂层产生微裂缝,为腐蚀介质渗入提供通道。水生生物黏附在特定位置后,会改变局部氧浓度分布,形成新的腐蚀微环境,从而加速点蚀的产生与扩展。

工程施工与运行中的细节因素亦会影响腐蚀机理的实际表现。表面处理质量不达标、粗糙度不均、盐分未清除或焊渣残留,都可能成为腐蚀反应的初始诱因,使局部区域成为腐蚀敏感点。金属材料若存在组织偏析、夹杂物或应力集中,会降低抗蚀稳定性,使腐蚀速率呈不均匀状态。部分水电站在运行期进行启闭操作时,金属结构频繁接触不同压力与流速水流,使腐蚀过程呈周期性强化。当结构处在低频振动和水击压力作用下,微裂纹更容易扩展并与电化学腐蚀结合,形成疲劳腐蚀模式,使耐久性进一步下降。多种因素相互叠加,使水电工程金属结构的腐蚀问题表现为系统性与持续性,需要从机理与环境条件的耦合作用中深入解析。

3 防腐技术体系的构建路径

在水电工程运行条件日趋多样化的背景下,金属结构的防腐技术体系需要在材料特性、环境条件以及施工要求之间建立协调结构,以形成稳定的防护屏障。防腐体系的构建离不开表面处理环节,金属基体在喷砂、抛丸或高压水射流清理后,表面活化程度明显提高,粗糙度达到适宜范围,能够增强涂层的机械咬合力与附着力^[3]。不同部位的结构受力与环境介质差异明显,防腐体系的选择需要结合水头压力、含沙量、水化学成分及温度变化进行匹配,使涂层在耐水性、抗渗透性与耐磨蚀性之间取得均衡。防腐材料的体系化组合不仅包括底漆、中间漆与面漆的协同作用,还需考虑无机富锌涂层、环氧涂层、聚氨酯类面漆等在电化学保护与物理隔离中的分工,使整个体系具有冗余性与持续性。

在复杂水工环境中,单一涂层体系难以长期承受水流冲刷、泥沙磨蚀与水化学侵蚀的复合作用,复合型防护措施便成为体系构建的重要方向。金属结构在关键部位可采用热喷涂锌铝合金作为牺牲阳极层,进一步降低基体金属的阳极电位,使腐蚀反应趋势减弱。部分高磨蚀区域需增加耐磨涂层或采用陶瓷增强型复合涂层,以提升抗冲蚀能力。表面处理、涂层搭配与密封工艺构成了多重保护体系,使腐蚀介质难以穿透完整的屏障。对于大型压力钢管、岔管及闸门系统,还需结合阴极保护技术,通过外加电流或牺牲阳极形成持续的电化学防护,减缓基体金属的溶解速度,使防护效果在长期运行中保持稳定。

构建完善的防腐技术体系还依赖严格的施工过程控制与质量管理。施工时的温湿度、露点温差、风速及金属表面洁净度均会直接影响涂层固化质量与成膜致密性,施工环境不稳定容易导致针孔、起泡、流挂等缺陷,使涂层在服役初期便产生隐患。涂装间隔时间、膜厚控制及固化条件需要通过实时监测与记录形成可追溯数据,以确保各层涂膜达到预期性能。对于焊缝、转角、螺栓连接处等敏感区域,应加强补强处理,采用

柔性或高延展性涂层避免应力集中引发裂纹。防腐体系的构建不仅依赖材料性能与技术组合,还要求设计、施工与运行维护的全过程参与,使金属结构在长期水工环境下保持稳定的耐久性与安全性。

4 验收标准与质量控制的实施要点

水电工程金属结构的防腐质量能否达到设计要求,在很大程度上取决于验收标准的执行力度与质量控制的严密程度。防腐验收的核心在于评估涂层体系的致密性、附着力与膜厚是否满足技术规范。表面处理质量是验收的初步依据,金属基体的清洁度、粗糙度区间以及氧化皮、油污与可溶盐残留情况均影响涂层的长期稳定性。膜厚测量需要依据规定取样频率与检测方法,通过磁性、超声或电涡流仪器进行检测,使涂层各层厚度达到均匀、连续且满足设计值的状态^[4]。涂层外观质量要求无针孔、缩孔、流挂或破膜等缺陷,高湿或低温环境下施工造成的表面异常必须在验收阶段被识别并处理,以避免在服役早期出现失效。

在金属结构防腐的验收过程中,涂层的附着力、硬度和耐水性能常作为关键指标,通过划格试验、拉脱实验或耐浸泡测试评估涂膜的整体性能。焊缝、棱角、孔洞周围等区域的防护质量需要单独检查,这些位置因几何结构复杂、涂层易堆积或变薄,更容易形成腐蚀敏感点。验收时还需关注阴极保护系统的输出电流密度、电位分布与工作稳定性,使其与涂层体系形成互补效果。在压力钢管、岔管或闸门等承压设备中,对关键部位的涂层厚度和均匀性应提高要求,以保证应力集中的区域具有足够的防护能力。验收工作不仅停留在表观质量评估,还包含性能检测与结构敏感区的强化检查,可使潜在缺陷在初期阶段被排查。

质量控制贯穿防腐施工与验收的全过程,以保证技术标准的可执行性和检测结果的可靠性。施工环境参数如温度、湿度、露点及风速需实时记录,使施工过程在可控范围内进行。每道涂层施工后必须进行固化时间监测与质量复核,避免因间隔时间不当导致层间附着力下降。在多层体系施工中,需依据工艺要求对涂层搭接、交叉部位与边缘处理进行专项控制,使涂膜形成连续不间断的保护覆盖。质量控制体系还应建立完整的施工记录、检测数据与现场影像资料,使验收具备可追溯性。通过严格执行技术标准与过程管理,防腐体系在投入运行前即可达到稳定可靠的质量水平,使金属结构在复杂水工环境中具备持续防护能力。

5 防腐技术与验收要求的综合评价

防腐技术体系与验收要求的关联性体现在材料性能、施工工艺与运行环境之间的匹配程度上。金属结构在水工环境中的腐蚀过程具有电化学反应持续、局部腐蚀易扩展及磨蚀介质不断叠加等特点,任何环节的薄弱都会引发防护体系的整体失

稳。防腐技术通过涂层体系、表面处理手段与电化学防护措施构建多层次的防护屏障,而验收要求则以定量指标与规范化检测方法检验防护体系的有效性^[5]。两者之间构成相互制约与相互验证的关系,使防腐措施从材料选择到成膜质量再到防护性能形成闭合链条。在长期运行条件下,技术体系的合理性必须通过验收结果加以确认,使腐蚀风险能够在结构投入使用前得到控制。

在水电工程中,防腐体系的性能并非完全取决于材料本身,还涉及施工质量与环境适应性。当涂层配套体系与水工环境的腐蚀特征不匹配时,即便验收阶段膜厚与外观满足要求,也可能在服役初期因渗透性不足或耐磨性能偏弱而出现失效。验收要求通过附着力、致密性和涂层连续性等指标评估施工工艺是否达到标准,使技术体系中潜在的工序性缺陷得以暴露。压力钢管、闸门、岔管等关键部位的检验尤为重要,涂层的均匀性、焊缝周围的补强处理及阴极保护电位分布均需与防腐设计保持一致,形成材料性能—施工过程—验收评价之间的对应关系。

综合评价的意义在于通过多维度分析揭示防腐体系在实

际工程中的运行表现,使技术与验收之间形成有效反馈。工程实践中常见的涂层起泡、局部脱落或缝隙腐蚀扩展现象,多与早期未被识别的缺陷有关,这些缺陷可能源自表面处理不充分、膜厚控制偏差或涂层间固化条件不稳定。综合评价需结合验收阶段的数据、运行期的环境监测与金属结构的腐蚀发展趋势,对防腐体系进行系统性判断,使工程管理者能够识别不同防护技术在复杂水工环境中的适用区间。通过这种评价方式,防腐措施不再停留在单一工序或局部指标,而是作为整体系统被审视,使水电工程金属结构在服役全周期内拥有更高的稳定性与腐蚀抵抗能力。

6 结语

防腐技术体系与验收标准在水电工程金属结构的长期服役中形成紧密关联,使工程在复杂水工环境下具备稳定抵抗腐蚀的能力。技术措施、施工质量与检测评价相互支撑,使防护体系呈现系统化特征。将腐蚀机理理解、技术路径构建与规范化验收结合,可使金属结构在运行周期内保持可靠性能,为工程安全与耐久性提供坚实基础。

参考文献:

- [1] 张少鹏.水利水电工程金属结构安装施工质量的控制[J].工程建设与设计,2025,(21):164-166.
- [2] 葛亚辉.水利水电工程的水闸施工技术研究[J].科学技术创新,2025,(20):131-134.
- [3] 牛耕.水利闸门金属结构防腐处理技术研究[J].水上安全,2025,(11):1-3.
- [4] 张伟亚.水利水电工程施工质量控制与优化策略研究[J].水利科学与寒区工程,2025,8(05):138-140.
- [5] 周华强,周林.水库闸门金属结构防腐处理技术研究[J].水电站机电技术,2024,47(11):142-145.