

热力设备腐蚀机理与防护研究

邵 欢

中核第七研究设计院有限公司 山西 太原 030000

摘 要: 核电热力设备长期处于高温高压、中子辐照及汽水两相流复杂工况,局部腐蚀失效是影响机组安全稳定运行与设备服役寿命的核心问题。本文系统梳理核电一、二回路设备典型腐蚀类型,阐明氧腐蚀、酸性腐蚀、垢下腐蚀及辐照应力腐蚀的电化学发生机理与演化规律,剖析介质参数、运行工况及设备结构材质的腐蚀影响机制。针对传统火电衍生防腐技术适配性不足、辐照稳定性差等工程短板,从药剂改良、材质选型、结构优化及运维工艺四个维度开展防腐技术优化,形成适配核级严苛工况的防护体系,可为核电热力设备防腐技改与设计优化提供工程参考。

关键词: 核电热力设备;局部腐蚀;腐蚀机理;辐照腐蚀;防腐防护

引言: 核电热力系统是核电站能量转换与安全运行的核心载体,设备长期启停调峰、高温高压及堆内辐照耦合作用,使其腐蚀失效风险远高于常规火电热力设备。局部腐蚀、应力开裂等缺陷易引发管道减薄、设备渗漏及停机故障,直接制约机组运行安全性与服役周期。目前行业沿用的常规防腐技术多基于火电体系改良,难以适配核电专属辐照、变工况运行环境,存在防腐寿命短、工况适配性差等实际问题。基于此,本文结合核电工程设计与技改经验,深入揭示设备腐蚀机理,优化适配核电工况的防腐技术体系,为解决现场腐蚀难题提供技术支撑。

1 核电热力设备典型局部腐蚀发生机理研究

1.1 氧腐蚀、酸性腐蚀电化学反应机理

核电厂高低压加热器、凝结水管道、辅助热力管网为氧腐蚀、酸性腐蚀高发设备,两类腐蚀依托电化学体系发生,腐蚀点位集中在设备内壁低洼死角、疏水滞留区,腐蚀具备极强局部聚集性。(1)溶解氧腐蚀机理:机组稳态运行时,二回路给水残余溶解氧含量超标,碳钢基体发生阳极溶解反应,铁单质解离为亚铁离子;介质内溶解氧在金属钝化膜破损处完成阴极还原,生成氢氧根离子,二者结合生成疏松多孔氢氧化铁腐蚀产物。该产物无法附着金属表面,会随汽水介质剥离流失,持续裸露新鲜金属基体,循环推进局部腐蚀。(2)酸性介质腐蚀机理:核电机组启停换气、补水置换阶段,空气内二氧化碳融入凝结水,生成弱碳酸降低介质pH值;一回路的硼酸调控偏移、氯离子富集也会提升介质酸性。氢离子直接参与阴极反应,破坏不锈钢、低合金钢表层钝化膜,无膜层防护区域优先发生局部点蚀,腐蚀孔径固定、深度增长速度快。

1.2 垢下腐蚀、流动加速腐蚀演化机理

蒸汽发生器换热管、汽水联箱、节流管件是垢下腐蚀与流动加速腐蚀核心载体,两类腐蚀为核电二回路频发失效类型,多伴随耦合发生。(1)垢下腐蚀机理:给水杂质、管壁氧化铁沉积形成水垢、泥垢堆积层,垢层覆盖区域介质流通受阻,垢下氯离子、硫酸根离子不断富集,局部pH值大幅降低,形成闭塞腐蚀电池。垢下金属持续阳极溶解,垢外完好金属作为阴极,阴阳极面积差拉大腐蚀电位差,最终造成管壁内侧深坑状腐蚀,是换热管减薄穿孔主要诱因。(2)流动加速腐蚀机理:汽水两相流、高速单相水流冲刷管道弯头、变径、焊缝位置,机械水流剥离金属表层原生氧化保护膜。膜层破损后金属直接接触高温介质,持续发生电化学腐蚀,同时水流持续带走新生腐蚀产物,阻碍钝化膜二次生成,腐蚀点位固定于流体冲刷面,腐蚀形貌呈光滑沟槽状^[1]。

1.3 辐照耦合应力腐蚀开裂机理及失效规律

该腐蚀专属核电一回路的承压热力设备,涵盖主冷却剂管道、压力容器接管、蒸发器管板,区别于常规火电热力设备腐蚀,由辐照、介质、结构应力三方耦合诱发。(1)辐照介质改性机理:堆芯高能中子辐照改变一回路的组分,分解水分子生成氧化性自由基,提升介质电化学活性,同时破坏奥氏体不锈钢金属晶格,增大晶界杂质析出量,弱化晶界耐腐蚀性能。(2)应力开裂演化机理:设备焊接残余应力、运行承压应力集中于焊缝、管板开孔位置,晶界耐蚀性下降后,腐蚀介质沿晶界向内渗透,逐步萌生微裂纹;在恒定拉应力作用下,微裂纹持续扩展延伸,最终形成沿晶型应力开裂,属于不可逆高危腐蚀失效形式。

1.4 启停工况停用腐蚀诱因与反应路径

核电调峰、检修停机期间热力设备停用腐蚀,为间歇式局部腐蚀,全厂汽水系统容器、管道均会发生,腐

蚀程度远超稳态运行工况。(1) 腐蚀核心诱因: 设备停运泄压后, 外部空气渗入设备腔体, 内壁残留积水贴合金属表面, 形成含氧薄液膜; 同时停运无法维持水质加药保护, 薄液膜电解质浓度升高, 天然形成微腐蚀电池。(2) 分步反应路径: 第一步, 薄液膜氧气充足, 金属表层快速发生阳极氧化, 生成初期腐蚀锈层; 第二步, 锈层覆盖区域氧气匮乏, 形成闭塞电池, 诱发局部点蚀; 第三步, 机组重启升温升压后, 停用腐蚀蚀坑成为运行腐蚀活化点位, 叠加高温介质作用, 进一步扩大腐蚀损伤, 缩短设备服役年限^[2]。

2 热力设备腐蚀关键影响因子

结合核电一、二回路热力设备运行实况, 腐蚀发展核心关键因子如下: (1) 汽水介质理化因子。介质杂质离子为核心腐蚀诱因, 一回路硼酸、氯离子、硫酸根离子会破坏不锈钢钝化膜, 二回路溶解氧、游离二氧化碳直接诱发电化学腐蚀; 介质电导率升高会缩小金属阴阳极电位差, 加快阳极溶解速率。同时介质pH值决定腐蚀形态, 偏酸性介质易催生点蚀、晶间腐蚀, 中性碱性介质多发生均匀腐蚀。(2) 运行工况参数因子。核电稳态高温高压环境会降低介质离子活化能, 提升腐蚀反应速率; 机组变负荷、频繁启停会造成温度交变, 引发金属表层氧化膜开裂脱落。此外堆芯中子辐照仅作用于一回路的设备, 改性介质组分、破坏金属晶格, 专属提升承压构件腐蚀敏感性。(3) 设备本体材质与结构因子。低碳钢耐流动腐蚀能力弱, 奥氏体不锈钢抗点蚀性能优异, 但高应力下易发生辐照应力开裂; 设备焊缝、变径、法兰缝隙等结构死角, 易积存污垢与电解质, 形成闭塞腐蚀微区。流场紊乱区域会持续剥离钝化膜, 固定腐蚀点位, 加剧局部腐蚀。

3 核电热力设备腐蚀防护技术及适配优化研究

3.1 现有热力设备常规防护技术机理及适用性分析

现阶段核电行业沿用的热力设备常规防护技术, 沿用火电防腐体系改良而来, 主要分为介质调控防护、电化学防护、表面防护三类, 工艺成熟、运维成本低, 配套检测管控体系完善, 但受核电堆内 $10\sim 10\text{n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 中子辐照、一回路 $15.5\text{MPa}/320^\circ\text{C}$ 高温高压、 $\text{pH}6.0\sim 6.5$ 硼酸碱性介质多重严苛工况限制, 存在工况适配短板、防腐寿命不足等问题, 各项技术机理与现场适配性如下。

(1) 给水水质化学调控防护。依托在线加药装置管控介质组分, 精准调控介质电导率($\leq 0.1\mu\text{S}/\text{cm}$)与pH值, 改变介质电化学属性, 从源头抑制腐蚀原电池反应。一回路采用硼酸+氢氧化锂联合pH调控体系, 控制介质pH维持 $6.9\sim 7.2$ 区间, 稳定介质酸碱度, 降低304、316不

锈钢晶间腐蚀概率; 二回路采用氨化处理、联氨除氧工艺, 将给水溶解氧控制低于 $5\mu\text{g}/\text{L}$, 抑制碳钢管道阳极溶解型氧腐蚀。该技术适配全厂稳态运行热力系统, 适配性最高, 但机组启停阶段汽水容积频繁置换, 药剂损耗速率提升30%以上, 药剂配比失衡后, 极易诱发氯离子富集富集于管板缝隙, 仅适用于负荷稳定、水质可控工况。(2) 阴极电化学防护。分为牺牲阳极阴极保护、外加电流阴极保护两种, 原理为抵消金属阳极电位, 抬高金属腐蚀电位 $80\sim 120\text{mV}$, 终止金属基体溶解反应。核电开放式水箱、外置低压疏水管道多采用锌合金牺牲阳极保护, 施工简便、后期运维量小; 大型常压储水压力容器采用外加电流阴极保护, 适配大面积金属构件均衡防护。该技术仅适用于常温 25°C 、低压 $\leq 1.6\text{MPa}$ 外置热力构件, 一回路 320°C 高温辐照环境会加速阳极材料晶格劣化、电位月衰减率超5%, 无法适配承压换热管道10年以上长期使用。(3) 常规涂层及材质防护。设备出厂内壁涂刷耐高温无机硅酸锌防腐涂层, 干膜厚度控制在 $80\sim 120\mu\text{m}$, 物理隔离金属与汽水介质接触; 常规辅助管路项目选用16Mn、20#碳素结构钢作为管道主材, 降低项目基建造价。普通防腐涂层耐中子辐照剂量低于 10^4Gy , 堆芯周边构件长期辐照下涂层1~2年内易粉化脱落; 碳钢材质抗流动加速腐蚀、垢下腐蚀性能薄弱, 腐蚀速率可达 $0.08\sim 0.12\text{mm}/\text{a}$, 仅可用于辅助冷却水管路、非承压附属设备, 不可用于蒸汽发生器、主冷凝管网核心承压设备^[3]。

3.2 适配核电工况的新型腐蚀防护技术优化研究

针对常规防腐技术难以适配核电一回路辐照应力耦合腐蚀、二回路汽水两相流冲刷腐蚀的工况短板, 结合核电热力系统成套设计与现场技改项目实践经验, 本文从缓蚀药剂、设备材质、流场结构、运维工艺四个核心维度开展防腐技术优化改良, 构建适配严苛核级工况的专项腐蚀防护体系, 整体技术优化逻辑与实施路径如图1所示。

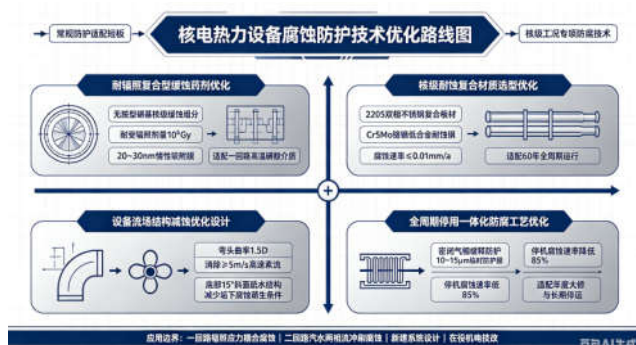


图1 核电热力设备适配型腐蚀防护优化技术体系

(1) 耐辐照复合型缓蚀药剂优化。摒弃传统有毒联

氨、单一氨类药剂体系,自主复配无胺型硼基核级缓蚀组分,大幅提升药剂的中子辐照耐受稳定性,药剂耐受辐照剂量可达 10^6Gy ,相较传统防腐药剂性能提升两个数量级。改良后的新型药剂可完美适配一回路 320°C 高温硼酸介质运行环境,能够定向吸附于不锈钢管壁表面,形成 $20\sim 30\text{nm}$ 的致密惰性防护膜,有效阻隔氯离子、自由基腐蚀离子的渗透侵蚀;同时可显著降低二回路机组启停阶段二氧化碳溶蚀破坏风险,无需频繁调试药剂浓度参数,适配机组调峰、频繁启停的变工况运行模式,彻底规避传统药剂辐照分解、二次杂质析出等缺陷,各项指标均可满足核电厂放射性废液 $\leq 100\text{Bq/L}$ 的行业排放标准与限值要求。(2)核级耐蚀复合材质选型优化。针对热力管道焊缝、变径、节流结构等腐蚀高发薄弱点位,替换传统均质碳钢材质,优选2205双相不锈钢复合板材、Cr5Mo铬钼低合金耐蚀钢作为核心设备用材。该类优质材质晶界碳化物析出量降低40%以上,抗辐照应力开裂、抗高速流动腐蚀性能显著优于普通奥氏体不锈钢,设备年均腐蚀速率可稳定控制在 0.01mm/a 以内;在管板、换热管对接关键部位采用ER耐蚀埋弧堆焊工艺,可消除90%以上的焊接残余拉应力,从源头弱化缝隙腐蚀的萌生条件,可适配蒸汽发生器、高低压加热器等核心承压设备,满足核电设备60年全周期启停运行的工况要求。(3)设备流场结构减蚀优化设计。依托热力水力仿真数值模拟计算,对设备管路结构进行专项减蚀优化,将管道弯头曲率优化至1.5D标准,精准匹配节流件开孔尺寸,有效消除介质流速 $\geq 5\text{m/s}$ 的局部高速紊流、负压涡流等恶劣流场区域;将设备容器底部优化为 15° 斜面疏水结构,取消传统直角死角结构,彻底解决氧化铁垢、泥沙杂质淤积问题,从设备结构设计层面阻断闭塞型垢下腐蚀的萌生路径。该优化方式属于前置主动防护手段,无需后期持续投入药剂、防腐耗材,适配新建核电热力系统的工艺设计流程,可精准匹配设计院设备成套设计、防腐专项设计的工作标准。(4)全周期停用一体

化防腐工艺优化。针对核电设备停机检修、长期停运的防腐痛点,优化传统单一的停机干法防锈、湿法浸泡防护工艺,创新采用密闭气相缓释一体化防护工艺。在机组检修停机期间,通过密闭管路腔体缓释气相有机缓蚀组分,在金属内壁均匀生成 $10\sim 15\mu\text{m}$ 的稳定临时防护膜,省去传统工艺的停机排水、内壁风干等繁琐工序,有效规避空气渗入形成薄液膜诱发的停用点蚀问题,可将设备停机阶段腐蚀速率降低85%以上,在保障机组检修拆装便捷性的同时,大幅提升停运工况下的防腐稳定性,适配核电年度大修、3~12个月长周期停运用等各类运维场景^[4]。

结束语:本文通过分析核电热力设备各类局部腐蚀的反应机理与失效特征,明确介质理化参数、运行工况及结构材质是控制腐蚀发展的关键因素。经针对性优化改良,新型耐辐照药剂、核级复合材质、流场减蚀结构及全周期停用防腐工艺,有效弥补了传统防护技术的工况适配短板,显著提升复杂工况下的防腐稳定性。整套优化技术兼顾设备全生命周期运行需求与核电安全排放标准,适配机组稳态运行、频繁启停及长期停运等多场景,能够有效降低热力设备腐蚀失效概率,具备良好的工程应用与推广价值。

参考文献

- [1]乔睿鑫,董亮,陈建栋,邱晓波.核电厂二回路金属管道流动加速腐蚀与防护的研究进展[J].腐蚀与防护,2024,45(2):10-17.
- [2]朱世勇.常减压装置加热炉管高温硫腐蚀机理与防护方案研究[J].石油石化物资采购,2026(4):49-51.
- [3]彭可馨,袁骊,江锋.核电厂循环冷却水系统热交换器海水侧腐蚀机理与防护[J].全面腐蚀控制,2022,36(8):121-124.
- [4]周澄,王坤,吴昉赞.核电厂凝汽器出口管道冲刷腐蚀失效机理及防护策略研究[J].全面腐蚀控制,2025,39(10):96-98.