

核电工程金属材料腐蚀问题及防护措施研究

王绍尉

中广核陆丰核电有限公司 广东 陆丰 516500

【摘要】：核电工程金属构件长期处于高温高压水、交变应力、辐照及停运潮湿环境，腐蚀会造成壁厚减薄，也会通过裂纹、沉积物迁移和界面损伤影响设备可靠性。本文梳理碳钢、不锈钢、镍基合金及焊接接头的腐蚀特性，从建设调试迹象和关键设备劣化两条路径提出识别方法，并围绕选材屏障、水化学控制、施工保全、分级监测形成防护闭环。分析认为，腐蚀管理须把材料环境适配、过程记录与检维修决策关联，才能将局部缺陷控制在可追溯、可干预范围内。

【关键词】：核电工程；金属材料；腐蚀识别；水化学控制；全寿期防护

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.088

引言

核电工程一回路、二回路、辅助系统和安全壳内部配置大量承压管道、换热设备、支吊架及测量构件，其材质和服役环境并不相同。腐蚀风险还会跨越设计、采购、安装、调试和运行阶段：制造残余应力、现场污染、水化学偏移与停运保养不足可能在同一薄弱部位叠加。只在泄漏或明显锈蚀后处置，难以满足核安全设备对完整性和可用性的要求。本文以腐蚀机理、现场证据和管理动作的对应关系为主线，讨论识别与防护方法，为工程建设期和运行移交阶段的腐蚀控制提供参考。

1 核电工程金属材料腐蚀特性

核电工程金属腐蚀由材料组织、应力与局部环境共同驱动。碳钢和低合金钢用于二回路及辅助系统，在含氧水、湿热环境和高速流体中易发生均匀腐蚀与流动加速腐蚀；不锈钢依靠钝化膜耐蚀，铁污染、氯离子富集或缝隙滞流会诱发点蚀；镍基合金在高温水中仍可能因晶界状态、拉应力和水化学耦合产生应力腐蚀开裂。焊缝、热影响区及异种金属界面兼有组织差异、残余应力和滞流条件，是重点检查位置。溶解氧、pH值与杂质离子会改变氧化膜形成和溶解过程，水化学控制须与表面状态联合评估，并把取样时点、温度和设备位置一同归档^[1]。辐照会改变微观缺陷和晶界化学状态，堆芯构件还承受复杂应力，腐蚀评价不能照搬常规化工设备判断方法^[2]。腐蚀产物还会迁移至传热面形成沉积，控制对象需覆盖壁厚、裂纹、氧化膜和界面完整性。现场判读还应区分基材损伤与表面沉积，避免将清洁问题直接升级为材料失效。

2 核电工程金属材料腐蚀状态的识别方法

腐蚀识别应依次确认对象、环境、机制和后果。先依据材料清单与系统流程图标记易积水、异种金属连接、保温层下方、焊缝密集及流向突变位置，再以目视、固定坐标测厚、表面成分和无损检测相互验证。单次测厚只说明检查时刻状态，测点坐标、探头方向、基准面与前次数据必须保留；表面锈迹也要区分外来铁污染、浮锈、涂层破损与基材腐蚀。裂纹类指示应结合应力来源、材料敏感性和介质条件判定，不能用打磨后暂

时消失替代原因分析。识别结果分为可接受、跟踪、修复和停工评估四级，并写明证据强度、责任人和复查时点。证据之间存在冲突时先保留原始结果并复测，不用单一方法覆盖其他异常。

2.1 建设与调试阶段表面腐蚀迹象识别

建设调试期间水化学尚不稳定，设备开口、临时封堵、冲洗排水和海运仓储使环境频繁变化。到货验收核对包装、干燥剂、端口封盖和保护层，水痕、盐霜或变色按构件编号留痕。安装时将不锈钢作业区与碳钢切割区分隔，工具、磨料专用，防止铁粉和含氯清洁剂破坏钝化膜。水压试验结束后沿流向核对低点、盲端、阀腔及换热器排水，保温封闭前检查法兰缝隙和临时支撑接触面。建设阶段腐蚀管理需要在安装、试验、保管和移交之间持续衔接，并把异常位置、处理动作和复查结论沿设备编码传递^[3]。热态功能试验按升温、保温、降温和停运阶段绑定水质记录与表面检查；发现颗粒或沉积物先确认来源和成分，再决定冲洗、钝化或局部处理。异常照片、清理方法和复检结果最终绑定设备编码。移交清单保留未关闭项和首循环观察要求，使运行单位能够延续跟踪。

2.2 关键设备与管道材料劣化判定

关键设备从承载能力、泄漏屏障和功能保持三方面判定。管道固定测点应避开焊缝余高并校核声速，在弯头外弧、三通下游、节流件后方与两相流区加密；壁厚变化只在相同坐标和可比工况下计算。蒸汽发生器、换热管和镍基合金焊缝侧重裂纹及沉积物，涡流、渗透或超声结果需结合缺陷方向、尺寸和应力区解释。腐蚀产物沉积会改变传热和局部水化学，预测、取样与治理应连续进行，并将上游材料减薄与沉积趋势按同一时间轴比较^[4]。安全壳变位测量丝材截面小，局部腐蚀会影响有效截面和摩擦状态，保护层、积水及海洋大气污染需共同核查^[5]。裂纹证据不足时扩大同类部位筛查并保留样品，再将检测不确定度、剩余厚度和安全功能纳入多专业评审。同类设备的异常分布可用于确定扩查范围，但不能替代本设备的原位结果。同一固定测点的平均壁厚减薄速率按式（1）计算。

$$v = \frac{d_0 - d_t}{\Delta t} \quad (1)$$

式(1)中: v 为同一固定测点在观察周期内的平均减薄速率; d_0 为周期起点壁厚; d_t 为周期终点壁厚; Δt 为两次检测间隔。式(1)只用于同一坐标和一致检测口径下的趋势判断。 v 增大时需先排除耦合、声速和定位偏差,再结合相邻点、流动方向及水化学记录判断是否为真实加速减薄;单点结果不直接外推整条管线。

3 核电工程金属材料腐蚀防护措施

防护措施应对腐蚀链的可控环节:设计阶段处理材料与环境适配,制造安装阶段控制表面洁净、残余应力和异种材料接触,调试运行阶段控制水化学、流动与停运环境,检修阶段根据趋势校正检查范围。各类风险设置“预防动作—验证证据—失效处置”关系,预防动作写入采购条件、施工方案和运行规程,验证证据包含材质证明、表面检查、水质趋势与固定测点数据,失效处置明确隔离、清洗、修复或扩大检查。接口证据完整后,单项合格才能转化为设备完整性。责任边界随设备编码和工序节点登记,防止技术措施在专业接口处失去承接。

3.1 优化选材与表面屏障阻断腐蚀介质

选材按温度、介质、流速、辐照、应力和可焊性配置,不能只提高合金等级。碳钢适合水化学可控且便于测厚的系统;高温高压或裂纹后果严重的部位评估不锈钢、镍基合金及异种金属连接风险。采购验收除牌号和炉批,还检查热处理、晶间腐蚀敏感性、表面粗糙度与修磨记录。表面屏障依据环境选择涂层、镀层或封存膜,基面处理、露点差、干膜厚度、针孔和固化条件同步记录。保温层下金属控制可溶性氯离子和雨水入口,排水结构不得被密封材料堵塞。精密丝材的防护层要隔绝介质,同时保持尺寸和摩擦特性,防腐措施须兼顾测量功能,施工后还要复核丝材尺寸、张力状态与读数稳定性^[6]。现场修补使用相容体系并复查底层污染,避免补丁边缘形成新缝隙。屏障失效后应追查基面、环境和施工条件,而不是只增加下一道涂层厚度。不同风险等级的监测情景参数见表1。

表1 腐蚀风险分级监测情景参数

风险等级	建议复核周期/月	固定测点数/个	同类扩查点数/个	重点复查部位数/处
A	2.00	18	15	13
B	4.00	17	14	12
C	6.00	16	11	9
D	9.00	10	8	7
E	12.00	6	5	4
F	24.00	3	2	1

表1的建议复核周期、固定测点数、同类扩查点数和重点

复查部位数随风险等级变化。A级采用2个月周期,并配置18个固定测点、15个扩查点和13处重点部位;F级采用24个月周期,对应3个、2个和1处。参数仅用于展示分级方法,实际工程应按安全功能、历史趋势和适用规程校正。

3.2 控制水化学与局部环境减缓材料劣化

水化学控制要促使材料形成稳定保护膜,并减少腐蚀产物迁移和局部浓缩。一回路与二回路按材料和工况分别管理pH、溶解氧、电导率及杂质,取样点应覆盖主流区和风险支路。启停与长期停运会改变气体溶解和氧化膜稳定性,操作票需明确加药、置换、排水与取样时点。水质偏离后先核对仪表、取样链与污染源,再按持续时间评估影响。二回路流动加速腐蚀还受流速、含汽率和温度影响,水化学优化要与管件几何及测厚计划联动。蒸汽发生器化学清洗依据沉积物组成和材料相容性设置试验片、温度、浓度与终点,冲洗、钝化及废液控制一并验收^[7]。停运系统排净、干燥或受控湿保养,并用挂片、水质与固定测点验证效果。局部支路长期偏离主回路趋势时,应单独取样并核对滞流、温度与排气条件。

3.3 强化施工防护与设备保全能力

施工防护从到货延续到移交。仓储按不锈钢、碳钢、镍基合金和焊材分区,构件离地并防止包装低点积水;端口封盖用于防异物,并保留设备标识。安装过程用设备编码追溯炉批、焊口、清洁和保管状态,工具混用、临时点焊和碳钢绑丝接触不锈钢列入巡检。焊前清除油污、氯化物和铁污染,控制热输入及层间温度,焊后按材料要求清洁、钝化和检测。水压试验方案明确水源品质、排气排水和保留时间,无法排净的设备采用干燥空气或氮气保护。保温和涂层封闭前由安装、防腐及质量人员共同确认基材、修补与排水结构。异常处理先隔离污染源并保留证据,避免擅自深磨减少壁厚或掩盖缺陷。保全记录按周期更新,保护方式失效或环境改变时及时调整,不以一次封存长期销项。

3.4 建立监测分级与检维修闭环

监测体系把风险排序转为测点和周期。材料敏感、环境严苛或后果严重的部位设置固定坐标测厚、裂纹检测和在线参数;一般部位周期巡检,低风险部位仍保留基线。测点记录设备编码、材料、照片、检测方法、校准和工况,换仪器或人员时保持坐标一致。腐蚀释放模型用于理解氧化膜生成、溶解与产物迁移,但参数须由实际水化学和材料数据约束,不能替代现场检测^[8]。报警分为数据复核、扩大检查和维修评审三级;维修后回到原缺陷坐标复验,并检查相同材料、流动条件或施工批次的关联部位。监测结果回写水化学与表面屏障控制,同类缺陷重复出现时修改环境控制或施工标准,使闭环从发现缺陷延伸到消除机制。年度评审比较减薄、裂纹、沉积和水质偏差的共同趋势,据此调整下一周期范围。典型环境、材料、腐

蚀机制与防护动作的对应关系见图1。

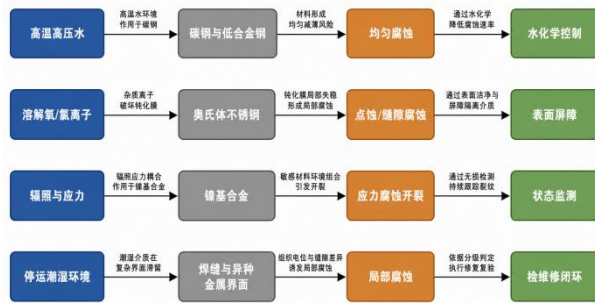
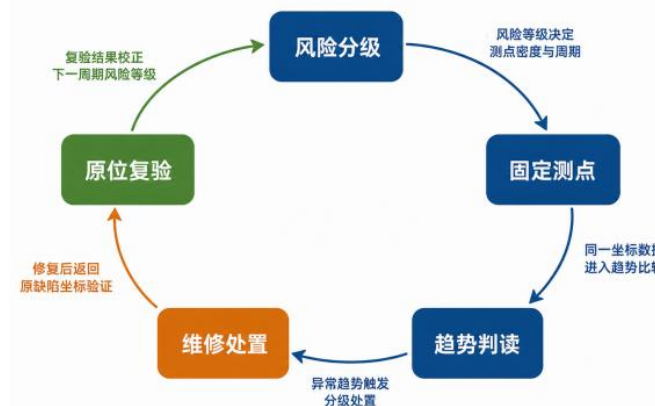


图1 核电工程金属材料腐蚀与防护路径

图1将四类环境分别绑定材料、损伤与控制动作。高温水条件下的碳钢减薄以水化学和测厚趋势协同控制；氯离子与缝隙作用下的不锈钢风险依靠表面屏障；辐照应力通道侧重裂纹监测；停运潮湿界面则需由分级检维修完成复验闭环。第一条关系图说明环境、材料与损伤通道的对应方式，闭环管理还需把检测证据继续转成处置和复验动作，避免监测停留在数据归档层面。风险分级、固定测点、趋势判读、维修处置和原位复验的闭环见图2。



参考文献:

- [1] 彭立园,吴欣强,张兹瑜,等.压水堆核电厂热态功能试验水化学与设备材料腐蚀关系的研究进展[J].中国腐蚀与防护学报,2024,44(3):529-539.
- [2] 马韦刚,邓平.核电厂堆芯材料辐照促进应力腐蚀研究[J].冶金与材料,2023,43(5):50-54.
- [3] 邓干合,肖调兵,张永良,等.我国核电站工程建设阶段的腐蚀管理建议[J].全面腐蚀控制,2024,38(1):81-86+95.
- [4] 陈杰,刘勇,赵清森,等.CPR1000 机组蒸汽发生器腐蚀产物沉积预测和治理[J].能源研究与管理,2023,15(2):160-166.
- [5] 申彤,朱建斌,鲍宇,等.核电站安全壳变位系统殷钢丝材腐蚀分析[J].金属功能材料,2024,31(4):97-106.
- [6] 芦瑶,申彤,杨航,等.核电厂安全壳变位测量系统监测丝材及防腐措施研究综述[J].海洋开发与管理,2024,41(S1):125-132.
- [7] 颜军明,许哲涵,刘锋,等.四代核电机组直流式蒸汽发生器化学清洗工艺研究[J].清洗世界,2025,41(3):1-3.
- [8] 李昌莹,金德升,毛玉龙.基于 PBR 的核电金属材料腐蚀释放模型研究[J].核技术,2023,46(7):97-102.

图2 腐蚀监测与检维修闭环

图2中,风险等级决定测点密度与复核周期,同一坐标数据支持趋势判读,异常趋势触发维修处置。修复完成后返回原缺陷坐标复验,复验结果再校正下一周期风险等级,避免用邻近合格点代替缺陷点销项。

4 核电工程腐蚀防护应用分析

压水堆工程可按建设与调试场景组织防护方案。将二回路碳钢弯头、不锈钢冲洗边界、镍基合金焊接接头、安全壳潮湿低点和变位测量丝材列为不同对象,分别配置材料证明、表面洁净、水质、无损检测与保全记录。热态功能试验前核对冲洗水质、低点排水和滤网颗粒,试验中记录水化学趋势,停运后立即排净或保养。蒸汽发生器沉积趋势增加时,先追查上游碳钢减薄、水质偏差与流动区域;丝材出现斑点时,核对保护层、积水路径和盐污染,并扩大同环境构件检查。效果按固定测点能否复现、水质与损伤能否对应、维修后缺陷是否下降三项证据判读。各单位共享设备编码和问题清单,写明异常来源、判定依据、责任边界及下一检查时点,再用运行趋势调整周期。应用初期先建立可复现基线,后续结论只使用相同位置、方法和可比工况的数据。

5 结语

核电工程金属材料腐蚀具有环境耦合、界面集中和跨阶段累积特征,单靠提高材料等级或事后修补无法覆盖全部风险。工程控制应从材料—环境—应力关系识别薄弱部位,用固定坐标检测、水化学记录和施工保全证据确认损伤机制,再以选材屏障、环境调节、过程洁净和分级检维修实施干预。建设、调试与运行移交采用同一设备编码和问题清单,可避免证据在专业接口处中断。后续还需以真实运行趋势修正模型和周期,使防护措施持续对应材料状态与设备安全功能。