

复杂工况下火电厂锅炉压力容器的金属腐蚀监测与无损检测技术选型

郭 文

润电能源科学技术有限公司 河南 郑州 450000

摘 要：随着我国能源结构转型和“双碳”目标的推进，火电作为基础性电源仍将在相当长时期内承担重要角色。锅炉压力容器作为火电厂核心承压设备，其安全运行直接关系到电厂整体可靠性与人员生命财产安全。在高温、高压、高湿、交变载荷及复杂化学介质等多重耦合作用下，金属材料易发生各类腐蚀损伤，如氧腐蚀、酸腐蚀、碱腐蚀、应力腐蚀开裂（SCC）、流动加速腐蚀（FAC）等，严重威胁设备完整性。本文系统分析了火电厂锅炉压力容器在复杂工况下的典型腐蚀机理与特征，梳理了当前主流的在线腐蚀监测技术与离线无损检测（NDT）方法，重点从适用性、灵敏度、成本效益、操作便捷性及环境适应性等维度构建了多准则技术选型模型，并结合典型应用场景提出分级分类的检测策略建议。研究表明，融合多种监测与检测手段、构建“在线预警+离线精检+智能诊断”的综合评估体系，是提升火电厂锅炉压力容器腐蚀风险管控能力的有效路径。

关键词：火电厂；锅炉压力容器；金属腐蚀；腐蚀监测；无损检测；技术选型

引言

火力发电厂是将燃料化学能转化为电能的重要设施，其中锅炉系统承担着能量转换的核心任务。锅炉压力容器（包括汽包、水冷壁、过热器、再热器、省煤器、联箱等）长期处于高温（可达600℃以上）、高压（超临界机组达25MPa以上）、高湿蒸汽及含杂质水化学环境之中，同时承受热应力、机械应力及振动载荷。在此类极端复杂工况下，金属材料不可避免地发生腐蚀、蠕变、疲劳等损伤机制，其中腐蚀是最普遍且最具隐蔽性的失效诱因之一。因此，建立科学、高效、精准的腐蚀监测与无损检测体系，对保障火电机组安全、稳定、经济运行具有重大现实意义。然而，现有检测技术种类繁多，原理各异，适用条件差异显著。如何在复杂多变的运行环境中合理选型，实现“早发现、准定位、可评估、能预警”，成为工程实践中的关键难题。本文旨在系统梳理腐蚀机理、监测与检测技术现状，并提出面向工程应用的技术选型框架与实施建议。

1 火电厂锅炉压力容器典型腐蚀机理与特征

1.1 氧腐蚀

氧腐蚀主要发生在给水系统及省煤器入口段，其根本原因在于水中溶解氧未被充分去除。在高温高压条件下，溶解氧与铁基体发生电化学反应，生成氢氧化亚铁或磁性氧化铁等腐蚀产物。这些产物通常结构疏松、附着力差，无法形成有效保护膜，反而会加速局部腐蚀进程。实际运行中，氧腐蚀常表现为点蚀或溃疡状腐蚀

坑，具有高度局部化特征，不仅造成管壁快速减薄，还可能成为疲劳裂纹的萌生源，进而诱发更严重的结构失效。

1.2 流动加速腐蚀

流动加速腐蚀是火电厂碳钢或低合金钢管道系统中最危险的腐蚀形式之一，尤其常见于省煤器出口、给水分配管、下降管弯头及节流元件下游等高流速区域。其机理在于高速水流持续冲刷金属表面的保护性磁铁矿（ Fe_3O_4 ）膜，使其不断剥离，暴露出的新鲜金属随即被溶解，从而形成均匀但不可逆的壁厚损失^[1]。FAC的发展往往悄无声息，常规目视检查难以察觉，一旦管壁减薄至临界值，极易发生突发性爆管，造成严重非停事故。值得注意的是，FAC速率受温度、pH值、流速、材质及水化学控制水平等多重因素影响，呈现出强烈的非线性特征。

1.3 酸/碱腐蚀

炉水pH值的失控是引发酸腐蚀或碱腐蚀的直接诱因。当pH值过低时，水呈酸性，金属表面的氧化膜被溶解，导致大面积均匀腐蚀甚至沟槽状侵蚀；而当pH值过高，特别是在局部浓缩区域（如沉积物下方或缝隙处），高浓度 OH^- 离子会与铁反应生成可溶性高铁酸盐，造成“碱脆”或“碱 gouging”。后者常伴随晶间腐蚀特征，严重削弱材料强度。这类腐蚀多与水处理不当、排污不畅或启停过程中水质波动密切相关，具有明显的工艺依赖性。

1.4 应力腐蚀开裂

应力腐蚀开裂是奥氏体不锈钢部件（如TP304H、TP347H过热器管）在特定腐蚀介质与拉伸应力共同作用下发生的脆性断裂现象。火电厂中， Cl^- 、 OH^- 等离子的存在，加之焊接残余应力或热应力的叠加，极易在焊缝热影响区或弯管外弧侧诱发穿晶或沿晶裂纹。SCC裂纹扩展速率快，断裂前几乎无宏观变形，具有极强的突发性和灾难性。近年来，随着机组深度调峰运行常态化，热循环引起的应力波动进一步加剧了SCC风险。

1.5 高温氧化与烟气侧腐蚀

高温受热面长期暴露于含硫、钒、钠、钾等杂质的高温烟气中，易发生复杂的高温腐蚀过程。一方面，金属表面形成多层氧化皮（如 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 Cr_2O_3 ），随运行时间延长而增厚、剥落，导致管壁减薄；另一方面，在存在硫酸盐或钒酸盐的环境下，熔融盐膜可破坏氧化铬保护层，引发加速硫化腐蚀或“热腐蚀”。此类腐蚀不仅降低传热效率，剥落的氧化皮还可能堵塞管道或磨损下游设备，形成连锁故障。

上述腐蚀类型在实际运行中往往并非孤立存在，而是相互交织、协同演化。例如，FAC减薄区域可能成为SCC的起始点，而垢下碱浓缩又可诱发局部应力集中，进一步促进裂纹萌生。这种多机制耦合的复杂性，对腐蚀监测与检测技术提出了更高的综合要求。

2 腐蚀监测与无损检测技术综述

2.1 在线腐蚀监测技术

在线腐蚀监测技术的核心价值在于实现设备运行期间的实时状态感知与早期风险预警。电阻探针法通过测量嵌入式金属探针因腐蚀导致的截面积减小所引起的电阻变化，间接推算平均腐蚀速率。该方法结构简单、成本低廉，适用于长期部署，但其响应存在滞后性，且难以区分均匀腐蚀与局部腐蚀，对点蚀等高风险形态敏感度不足。相比之下，电感探针法利用电磁感应原理，通过检测线圈电感随金属损失的变化来反映腐蚀程度，其优势在于耐高温性能优异（可达600℃以上），抗电磁干扰能力强，更适合安装于锅炉本体等恶劣环境，但空间分辨率有限，需定期校准确保精度^[2]。基于电化学原理的线性极化电阻法（LPR）则能够提供近乎瞬时的腐蚀速率信息，灵敏度高、响应快，特别适用于水质波动频繁的给水或凝结水系统。然而，LPR的有效性高度依赖于介质的导电性，且对非均匀腐蚀的表征能力较弱，通常需与其他监测手段配合使用。氢探针法则通过检测阴极反应产生的氢原子渗透量，间接反映酸性环境或FAC活性，适用于判断局部腐蚀倾向，但其定量精度受材料氢扩散系数、温度等因素影响较大，解释需谨慎。此外，超声波

测厚在线系统通过在关键部位永久安装高温耦合探头，实现周期性自动壁厚测量，虽能提供直接、定量的数据，但面临高温声耦合稳定性差、信号衰减严重及探头寿命有限等工程挑战。

2.2 离线无损检测技术

离线无损检测是机组检修期间对设备完整性进行全面评估的关键环节。超声波检测（UT）凭借其穿透力强、灵敏度高、可定量等优点，成为壁厚测量和内部缺陷探测的首选。其中，相控阵超声（PAUT）通过电子控制多晶片阵列实现声束偏转与聚焦，可对复杂几何结构（如管-管板焊缝、弯头）进行高分辨率成像，显著提升检测效率与可靠性；而导波检测（GWT）则利用低频超声波沿管道轴向传播的特性，单点激励即可覆盖数十米范围，特别适合对长直管段进行快速腐蚀筛查。射线检测（RT）通过X射线或 γ 射线穿透物体形成影像，能够直观显示壁厚减薄、裂纹、夹渣等缺陷形态，结果易于理解，但存在辐射安全风险、成本高昂且对微小均匀减薄的量化能力有限。涡流检测（ECT）基于电磁感应原理，对表面及近表面裂纹极为敏感，无需耦合剂，检测速度快，是奥氏体不锈钢应力腐蚀开裂检测的主流方法^[3]。然而，其穿透深度通常不超过5毫米，且检测信号易受材料磁导率、提离效应等因素干扰，需经验丰富的人员进行判读。漏磁检测（MFL）则专用于铁磁性材料，通过检测因腐蚀或裂纹引起的磁场畸变来定位缺陷，常用于水冷壁、省煤器等密集管排的快速普查。内窥镜检测虽不具备定量能力，但能直接观察管内表面状态，为判断腐蚀形貌、积垢程度及氧化皮剥落情况提供直观证据，常作为其他NDT方法的重要补充。

3 技术选型多准则分析模型

面对多样化的检测需求，单一技术难以满足所有场景。本文提出基于AHP（层次分析法）与工程经验融合的多准则选型模型，主要考量以下维度：

表1：技术选型多维度考量

准则	说明
适用性	是否匹配被检材料、温度、压力、介质及腐蚀类型
检测灵敏度	对微小缺陷（如0.1mm裂纹、0.05mm减薄）的识别能力
空间分辨率	定位精度与成像清晰度
检测效率	单次覆盖范围、检测速度、是否需停机
成本效益	设备投入、维护费用、人力成本与风险降低收益比
操作便捷性	安装难度、数据解读复杂度、自动化程度
环境适应性	耐高温、抗辐射、防爆、抗电磁干扰等

以FAC高风险区域（如省煤器出口弯管）为例：在线监测优先选用ER探针或在线UT系统，实现连续壁厚

监控；离线检测停机时采用GWT进行长距离筛查，对异常区段辅以PAUT精检；验证手段结合内窥镜观察腐蚀形貌。对于奥氏体不锈钢过热器SCC风险区：在线采用LPR或氢探针监测水质异常；离线以ECT为主，RT或PAUT为辅，重点检测焊缝热影响区。

4 典型应用场景下的技术选型策略

4.1 给水系统（FAC高发区）

给水系统，尤其是省煤器入口及下降管弯头区域，是FAC的典型高发区。针对此类区域，应构建“在线监控+离线精查”的双重防线。在线层面，可在关键管段安装电阻探针与线性极化探针组合，前者提供长期平均腐蚀趋势，后者捕捉水质突变引起的瞬时腐蚀加速，二者互补可有效预警FAC风险。离线检修时，优先采用导波检测对整段管道进行快速筛查，识别出壁厚异常区域后，再利用相控阵超声进行高精度定点复验，准确量化剩余壁厚。同时，必须强化水化学管理，严格控制给水pH值（通常维持在9.2-9.6）并彻底除氧，从源头上抑制FAC发生。

4.2 汽包与集中下降管（氧腐蚀、碱腐蚀）

汽包作为锅炉水循环的核心部件，其内部水侧易受氧腐蚀与碱腐蚀双重威胁，尤其在汽水分界面、排污口附近及沉积物下方。在线监测方面，可部署耐高温电感探针，实时跟踪局部腐蚀速率。停机检修时，应结合超声波测厚全面评估筒体及封头壁厚分布，并辅以内镜检查，直观确认是否存在溃疡状腐蚀坑或碱 gouging 痕迹。对于历史腐蚀严重的机组，建议增加局部区域的涡流或漏磁检测，以排查潜在的浅表裂纹^[4]。此外，优化排污制度、防止炉水局部浓缩，是预防碱腐蚀的根本措施。

4.3 高温过热器/再热器（SCC、高温腐蚀）

高温过热器与再热器长期服役于600℃以上烟气环境中，面临SCC与高温烟气腐蚀的双重挑战。在线监测应侧重于水质与烟气成分的协同监控，如通过氢探针监测给水还原性，结合烟气在线分析仪追踪Cl⁻、SO_x等腐蚀性组分浓度变化。离线检测则以涡流检测为主，对奥氏体不锈钢管进行全覆盖扫描，重点覆盖焊缝热影响区、弯管

外弧等高应力区域；对涡流可疑信号，可采用射线或相控阵超声进行交叉验证。对于新建或改造机组，应优先选用Super304H、HR3C等高Cr、高Ni含量的抗SCC新型材料，从根本上提升耐蚀性能。

4.4 水冷壁（垢下腐蚀、氢脆）

水冷壁管内壁易因燃烧不均、水质不良导致局部超温或结垢，进而引发垢下酸/碱腐蚀甚至氢脆。在线层面，应强化炉水pH、电导率、Fe含量等关键参数的实时监控，及时发现水质异常。检修期间，可采用漏磁或涡流检测对整片管排进行快速扫描，高效识别腐蚀减薄或裂纹区域；对异常点再辅以超声波测厚确认。同时，必须优化燃烧调整，避免火焰直接冲刷管壁造成局部过热，并加强化学清洗，清除沉积物以消除垢下腐蚀隐患。

5 结语

火电厂锅炉压力容器在复杂工况下面临多样化的腐蚀威胁，单一检测技术难以全面覆盖风险。本文系统分析了典型腐蚀机理，梳理了主流监测与检测技术特点，并构建了多准则选型模型。研究表明：（1）应根据设备部位、材料、运行参数及主导腐蚀类型，实施“分区分类、精准选型”策略；（2）在线监测重在早期预警与趋势跟踪，离线NDT重在精确评估与缺陷确认，二者互补不可或缺；（3）未来发展方向在于多技术融合、数据驱动与智能诊断，构建“感知—分析—决策—执行”闭环的腐蚀风险管理体系。建议火电企业建立基于风险的检验（RBI）制度，将腐蚀监测数据纳入设备完整性管理平台，推动从“被动检修”向“主动防控”转型，为火电机组安全、高效、长寿命运行提供坚实保障。

参考文献

- [1]谷明亮,刘艳萍,窦云朋,等.火电厂锅炉管道金属内壁缺陷检测方法研究[J].中国金属通报,2020,(09):158-159.
- [2]周江,吴思明,谢瑞祥,等.火电厂机组锅炉钢结构局部失效无损检测方法[J].石化技术,2025,32(03):27-29.
- [3]张永胜,魏辉,何俊富,等.火电厂锅炉腐蚀的原因及对策[J].化工管理,2021,(20):141-142.
- [4]王庆.火电厂锅炉常用无损检测技术的应用效果观察[J].中国金属通报,2019,(12):152+154.