

动力工程设备腐蚀监测中的电化学分析技术应用实践

王小贺

丹东金山热电有限公司, 辽宁 丹东 118011

摘 要 : 在动力工程领域, 设备腐蚀威胁着运行安全与经济效益。而随着现代化经济与科技的协同发展, 电化学分析技术开始广泛应用于动力学工程设备腐蚀监测工作中, 并发挥出了显著的应用优势。为确保电化学分析技术应用效果, 满足动力工程设备实际防腐监测需求, 本研究深挖电化学分析技术在设备腐蚀监测的实践应用。剖析基于电化学腐蚀原理的监测内核, 如阳极溶解、阴极吸氧反应构建监测机制。详述电位、电流、阻抗噪声测量技术在腐蚀电位、速率、状态监测中的实操要点。探究技术革新、多技术联用及智能化走向, 为动力工程设备腐蚀精准监测筑牢理论与实践根基。

关 键 词 : 电化学分析技术; 动力工程设备; 腐蚀监测

Application Practice of Electrochemical Analysis Technology in Corrosion Monitoring of Power Engineering Equipment

Wang Xiaohe

Dandong Jinshan Thermal Power Co., Ltd. Dandong, Liaoning 118011

Abstract : In the field of power engineering, equipment corrosion threatens operational safety and economic benefits. With the coordinated development of modern economy, science, and technology, electrochemical analysis technology has begun to be widely used in corrosion monitoring of kinetic engineering equipment, demonstrating significant application advantages. To ensure the effectiveness of electrochemical analysis technology and meet the actual corrosion monitoring needs of power engineering equipment, this study explores the practical application of electrochemical analysis technology in equipment corrosion monitoring. It analyzes the monitoring core based on the principle of electrochemical corrosion, such as anodic dissolution and cathodic oxygen absorption reaction to construct a monitoring mechanism. The study details the practical points of potential, current, and impedance noise measurement techniques in corrosion potential, rate, and condition monitoring. It also explores technological innovations, multi-technology combinations, and intelligent trends, laying a solid theoretical and practical foundation for precise corrosion monitoring of power engineering equipment.

Keywords : electrochemical analysis technology; power engineering equipment; corrosion monitoring

引言

在动力工程的宏大版图中, 各类设备持续运转, 为社会发展输送能量。然而, 设备腐蚀宛如隐匿的“杀手”, 悄然侵蚀设备, 缩短使用寿命, 甚至引发安全事故, 大幅增加维护成本。在此种情况下, 腐蚀监测技术的应用和发展, 开始受到动力工程设备领域的广泛关注。由于传统监测手段, 如目视检查、无损探伤等, 难以实时、精准捕捉腐蚀动态, 因此, 腐蚀监测传感技术、动力工程设备材料无损检测技术、电化学分析技术等现代化先进腐蚀监测手段, 开始渐渐走进动力工程领域, 在动力工程设备腐蚀监测中, 得到良好的应用和创新^[1]。其中, 电化学分析技术凭借高灵敏度、实时监测等优势, 宛如一道曙光, 为动力工程设备腐蚀监测开辟新路径。通过电化学分析技术的合理应用, 可对动力工程设备腐蚀情况做到及时、有效地监测。基于此, 电力工程领域和相关研究者需对此项技术做到足够重视, 明确其基本情况和应用优势等, 掌握其在动力工程设备腐蚀监测中的应用机理、应用基础及其作用机制等, 并在不断的实践应用中, 探索该技术的更多应用策略, 寻求其创新和发展方向。如此方可不断提升电化学分析技术的应用效果, 满足现代动力工程设备的实际腐蚀监测需求, 为其腐蚀问题的有效防治提供先进的技术支持^[2]。

一、电化学分析技术及其应用介绍

（一）电化学分析技术简介

电化学分析技术是基于电化学体系内的物质电学性质（包括电流、电位、电量和电阻等）和化学性质之间的关系，实现被测物质定量分析与定性分析的一种先进技术手段。该技术的核心是借助电极反应实现化学信号到电信号的转化，其基本分析方法包括电位分析法、伏安分析法、电导分析法、电解与库伦分析法、电化学阻抗谱分析法等^[3]。

（二）电化学分析技术的主要应用方向

电化学分析技术具有灵敏度高、选择性好、响应速度快、可原位监测等应用优势，因此该技术在当前的应用领域也十分广泛。在化学与材料科学领域中，该技术可用于成分分析、材料表征分析、合成与制备等方向。在环境科学与监测领域中，该技术可用于污染物检测、水质分析、大气污染监测等方向。在能源领域中，该技术可用于电池研究、电催化、超级电容等方向^[4]。在生物科学与生物技术领域中，该技术可用于生物检测、药物分析、医疗设备等方向。在工业与质量控制中，该技术可用于金属腐蚀监测、电镀与冶金、食品与化工等方向。在科研与基础研究中，该技术可用于反应机理研究、纳米技术研究等方向^[5]。

（三）电化学分析技术在动力工程设备腐蚀监测中的应用现状

在当前的动力工程设备腐蚀监测中，电化学分析技术已形成多个层次与维度的应用体系。其核心价值在于，实际应用中，该技术可根据实时电信号，对动力工程设备的腐蚀过程及其动态演变进行捕捉，从而为此类设备的安全运行提供重要数据支持^[6]。通过电化学分析技术的合理应用和创新，以及相关技术标准的不断完善，使动力工程设备腐蚀监测效果实现了显著提升，并为其安全、稳定运行提供良好保障。

二、电化学分析技术用于动力工程设备腐蚀监测的原理基础

（一）基于电化学腐蚀原理的监测机制

动力工程设备多为金属材质，在潮湿、含电解质的环境中，易发生电化学腐蚀^[7]。以钢铁设备为例，铁原子在阳极区域失去电子，发生氧化反应生成亚铁离子，电子通过金属内部传导至阴极区域，在阴极，氧气获得电子与水反应生成氢氧根离子。这一过程形成腐蚀电池，伴随电流产生。电化学分析技术正是利用这一原理，通过监测电流、电位变化，推算设备腐蚀速率与程度^[8]。例如，采用线性极化法，在金属表面施加微小极化电位，测量极化电流，依据极化电阻与腐蚀电流的反比关系，快速计算腐蚀速率，为设备腐蚀监测提供量化依据。

（二）电化学分析技术中电位测量原理在腐蚀监测的应用基础

电位测量是电化学分析技术的重要手段。金属在电解质溶液中会形成腐蚀电位，该电位与金属材质、溶液成分、温度等因素相关。通过参比电极与工作电极（待测设备）组成电化学池，测量两者间电位差，可获取设备腐蚀电位。当设备发生腐蚀时，腐

蚀电位会发生变化^[9]。如在酸性环境中，钢铁设备腐蚀加剧，腐蚀电位负移。依据能斯特方程，电位变化与溶液中离子浓度对数呈线性关系，据此可分析腐蚀反应进程，判断设备腐蚀趋势，为及时采取防护措施提供关键信息^[10]。

（三）电流与阻抗测量原理在动力工程设备腐蚀监测的作用机制

电流测量可直接反映腐蚀反应速率。在腐蚀过程中，阳极溶解产生的电流与腐蚀速率成正比。采用恒电位仪控制工作电极电位，测量流过的电流，能精确测定腐蚀电流密度，进而得出腐蚀速率^[11]。阻抗测量则是向电化学池施加小幅度交流信号，测量电极系统的阻抗响应。设备腐蚀时，其表面形成的腐蚀产物膜、氧化膜等会改变电极阻抗。通过分析阻抗谱图，可获取膜层电阻、电容等信息，评估腐蚀产物膜的防护性能，判断设备腐蚀状态，如膜层电阻降低，表明腐蚀产物膜受损，设备腐蚀风险增加^[12]。

三、电化学分析技术在动力工程设备腐蚀监测中的实践应用

（一）电位测量技术在动力工程设备腐蚀电位监测的实践

在动力工程设备腐蚀电位监测实践中，常采用饱和甘汞电极、银/氯化银电极作为参比电极，与设备金属表面构成测量回路^[13]。例如，在火电厂的循环水系统中，对碳钢材质的管道进行腐蚀电位监测。定期将参比电极放置在管道附近的循环水中，连接高阻抗电位计，测量管道与参比电极间电位差。绘制电位-时间曲线，若电位持续负移，提示管道腐蚀加剧。通过设置电位预警值，当电位达到预警范围，及时排查原因，采取添加缓蚀剂、调整水质等防护措施，有效预防管道腐蚀穿孔，保障循环水系统稳定运行^[14]。

（二）电流测量技术用于动力工程设备腐蚀速率监测的应用

电流测量技术广泛应用于动力工程设备腐蚀速率监测。以石油化工企业的储罐为例，利用电化学腐蚀监测仪，采用极化电阻法测量储罐壁金属的腐蚀电流。在储罐壁表面安装工作电极、参比电极与辅助电极，组成三电极体系。仪器向工作电极施加小幅度极化电位，测量极化电流，根据极化电阻与腐蚀电流的关系，快速计算出腐蚀速率^[15]。定期监测并记录腐蚀速率数据，建立腐蚀速率数据库。当腐蚀速率超过允许值，及时安排储罐维护，如进行表面涂层修复、更换腐蚀严重部位，确保储罐安全运行，避免物料泄漏引发安全事故^[16]。

（三）阻抗测量技术在动力工程设备腐蚀状态评估的实践操作

阻抗测量技术为动力工程设备腐蚀状态评估提供详细信息。在水电厂的金属闸门腐蚀状态评估中，运用电化学阻抗谱（EIS）技术。将工作电极固定在闸门表面，参比电极与辅助电极置于附近水体中，组成电化学测试系统。向系统施加频率范围为 10mHz - 100kHz 的正弦交流电压信号，测量不同频率下的阻抗响应，得到阻抗谱图。通过等效电路拟合分析，获取闸门表面氧化膜电阻、电容、双电层电容等参数。若氧化膜电阻降低、双电层电容增大，表明氧化膜受损，闸门腐蚀程度加深，据此制定针对性修

复方案，如进行防腐涂层重涂、阴极保护系统优化，保障闸门结构安全与使用寿命^[17]。

（四）噪声测量技术在动力工程设备腐蚀过程实时监测中的实践应用

噪声测量技术可对动力工程设备的具体腐蚀过程做到实时监测。通过两个工作电极，对动力工程设备腐蚀过程中产生的自然电位噪声与电流噪声进行测量，通过功率谱密度、均方根值等统计分析法，对动力工程设备腐蚀类型及其演化趋势做出有效评估。以燃煤电厂中的锅炉水碳钢冷却管壁腐蚀监测为例，将金属电极用作工作电极，固定安装在锅炉水回路上，对其实施噪声监测。若发现噪声信号均方根值骤增，且功率谱中有高频成分出现，则表明设备可能存在点状腐蚀或裂缝腐蚀情况。再结合监测到的噪声电阻变化情况，可对设备腐蚀加速区域做出准确分析，以便及时发出相应的腐蚀预警，为运维人员及时调节锅炉水 pH 或缓蚀剂添加等工作的开展提供支持，以免设备腐蚀情况的进一步发展，确保设备的安全、稳定运行^[18]。

四、电化学分析技术在动力工程设备腐蚀监测中的发展趋势

（一）与其他监测技术融合在动力工程设备腐蚀监测的发展趋势

与其他监测技术融合是未来发展趋势。将电化学分析技术与无损检测技术，如超声检测、红外热成像技术结合。超声检测可探测设备内部腐蚀缺陷，红外热成像能监测设备表面温度分布，反映腐蚀部位热量变化，与电化学分析技术获取的腐蚀电位、电流、阻抗信息相互印证，实现对设备腐蚀的全方位、多层次监测。而且，融合机器学习算法，对多源监测数据进行分析处理，提高腐蚀预测准确性，提前预警设备腐蚀风险^[19]。

（二）电化学分析技术的创新与改进方向

电化学分析技术正朝着更高灵敏度、更精准测量方向创新改进。研发新型电极材料，如基于纳米技术的修饰电极，可显著提高电极对腐蚀相关物质的选择性与灵敏度。优化测量仪器，采用数字化、智能化技术，降低测量噪声，提高测量精度与稳定性。例如，开发基于微机电系统（MEMS）技术的微型电化学传感器，体积小、响应快，可实现对设备局部腐蚀的原位、实时监测，为动力工程设备腐蚀监测提供更精细、准确的数据。

（三）基于电化学分析技术的动力工程设备腐蚀监测智能化发展前景

智能化发展前景广阔。构建基于物联网的腐蚀监测系统，将分布在不同区域的电化学传感器连接至网络，实现数据实时传输与远程监控。利用大数据分析技术，对海量监测数据挖掘分析，建立设备腐蚀模型，预测腐蚀发展趋势^[20]。例如，通过分析不同工况下设备腐蚀数据，结合环境参数、运行时间等因素，预测设备剩余使用寿命，为设备维护计划制定提供科学依据，实现动力工程设备腐蚀监测的智能化、自动化管理。

五、结论

电化学分析技术在动力工程设备腐蚀监测中展现出巨大潜力，从原理层面提供精准监测依据，在实践中实现腐蚀电位、速率、状态的有效监测。当前，设备复杂工况对技术适应性提出高要求。尽管面临技术创新、融合、智能化发展等挑战，但凭借持续探索，定能突破困境。未来，该技术将在动力工程设备腐蚀监测中发挥关键作用，保障设备稳定运行，推动行业安全、高效发展。

参考文献

- [1] 余卫华, 李杰, 李江文, 等. 化学分析技术在冶金表面分析中的应用 [J]. 冶金分析, 2023, 43(08): 1-9.
- [2] 陈瑞程, 雷庆关, 樊玮洁. 电化学技术对混凝土显微硬度的影响分析 [J]. 安徽建筑, 2023, 30(04): 159-161.
- [3] 周正, 徐仕先, 丁卫华, 等. 电化学储能安全性分析及预警技术进展 [J]. 工业安全与环保, 2023, 49(02): 54-56.
- [4] 焦琪静, 郑伟, 柳叶芳, 等. 热轧带肋钢筋电化学腐蚀监测技术综述 [J]. 中国金属通报, 2024(5): 89-91.
- [5] 高智悦, 樊志彬, 王小明, 等. 金属构件腐蚀原位监测电化学传感器研究综述 [J]. 山东电力技术, 2023, 50(3): 20-25.
- [6] 刘炳岩, 王立达, 孙文, 等. 一种用于原位测量盐酸露点腐蚀的电化学阻抗探针 [J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(2): 7-12.
- [7] 汪科宇. PCB 腐蚀电化学迁移行为及机理研究 [D]. 中国民航大学, 2023.
- [8] 李祥翔, 金祖权, 逢博. 杂散电流与复合离子作用下埋地碱激发矿渣混凝土中钢筋锈蚀研究 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(10): 3595-3606.
- [9] 李婷玉, 魏洁, 陈楠, 等. 用于大气环境的电化学传感器的腐蚀性能研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(2): 365-371.
- [10] 胡全, 胡泰山, 李波, 等. 输电线路近地电场对接地极腐蚀的影响及防腐措施 [J]. 腐蚀与防护, 2024, 45(5): 82-86.
- [11] 张驰. 碳纤维增强高分子复合材料的电化学行为及其与典型工程合金的电偶腐蚀过程研究 [D]. 厦门大学, 2020.
- [12] 刘志峰, 廖建平, 徐永辉, 等. 接地网腐蚀的电化学在线监测技术 [J]. 全面腐蚀控制, 2023, 37(6): 78-81.
- [13] 白一涵, 张航, 朱泽洁, 等. 缝隙腐蚀内部微区离子浓度监测的研究进展 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(4): 828-836.
- [14] 姜碧波, 张超, 王颖杰. 腐蚀性气体浓度在线监测系统设计 [J]. 仪表技术, 2024(1): 6-9.
- [15] 韩一峰, 朱焯森, 陈皖滨, 等. 海管焊接接头腐蚀特性及监测方法研究进展 [J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 98-108.
- [16] 杨一潇. 埋地 X70 钢油气管道腐蚀防护与远程监控的研究 [D]. 西安理工大学, 2023.
- [17] 曹文凯, 郑海兵, 王艳丽, 等. 海水拌和混凝土中不锈钢筋早期腐蚀电化学行为研究 [J]. 表面技术, 2024, 53(6): 80-89.
- [18] 刘洋, 卢珊珊, 史艳梅, 等. 微分电化学质谱测定石墨在析氧反应中的结构腐蚀 [J]. 质谱学报, 2024, 45(4): 465-471.
- [19] 聂振宇, 艾莉. 氟碳封孔剂封孔处理对 8YSZ 热障涂层电化学腐蚀及抗盐雾腐蚀性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2023, 47(8): 79-85.
- [20] 梁继伟, 毛文艳, 王星宇, 等. 基于硫化纳米零价铁的电化学腐蚀特性研究 [J]. 南京理工大学学报 (自然科学版), 2023, 47(5): 724-730.