

武器装备

装备封存的环境质量与腐蚀在线监控
的信息化管理技术马云飞¹, 朱军亮², 孟令东³(1. 陆军后勤部信息保障室, 北京 100000; 2. 陆军乌鲁木齐储供基地, 乌鲁木齐 830000;
3. 陆军装甲兵学院 装备保障与再制造系, 北京 100000)

摘要: 为了提高装备封存保养质量和后勤保障水平, 对仓储环境中高温、高湿、霉变和污染气体等几种典型的腐蚀因子进行了简单的综述。然后从仓储环境质量监控的自动化和信息化方面, 对比分析了当前主流的多种腐蚀在线监测传感器技术。此外, 对仓储环境空气质量监控的网络化与信息化管理进行了展望, 通过在仓储环境关键部位安装多种腐蚀监测传感器和温湿度传感器, 并在基础上组建分布式腐蚀与空气质量监控网络, 通过反馈控制实现智能化的温湿度调节、空气过滤和气相缓蚀剂加注等仓储环境质量管理体系, 这将有利于及早发现防锈包装材料的破损泄露和腐蚀隐患, 通过主动预警, 降低人工巡检的劳动强度, 提高装备的保养效率。

关键词: 装备封存; 大气腐蚀; 腐蚀监测; 信息化; 质量管理; 主动预警

中图分类号: TJ089

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)08-0042-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.08.007

Online Corrosion Monitoring Information Management of Storage
Environmental Quality for EquipmentMA Yun-fei¹, ZHU Jun-liang², MENG Ling-dong³

(1. Information Support Department of PLA Logistics, Beijing 100000, China; 2. Urumqi Storage and Supply Base of PLA, Urumqi 830000, China; 3. Department of Equipment Support and Remanufacturing, Armored Corps Academy of PLA, Beijing 100000, China)

ABSTRACT: The paper aims to improve the equipment-support capacity of logistics. Several typical corrosion factors are briefly summarized, such as high temperature, high humidity, mildew, and polluted gas in storage environment. Then a contrastive analysis is conducted for some current corrosion online monitoring technologies based on automation and informatization of environment monitoring. Moreover, the network and information management of storage environment monitoring are prospected. Some corrosion monitoring and temperature-humidity sensors are suggested to install in key parts, based on that, a distributed corrosion and environment quality monitoring network is established, thus building intelligent environmental quality

收稿日期: 2022-06-30; 修订日期: 2022-07-25

Received: 2022-06-30; Revised: 2022-07-25

作者简介: 马云飞 (1983—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为后勤信息化。

Biography: MA Yun-fei (1983-), Female, Master, Engineer, Research focus: logistics information.

通讯作者: 孟令东 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为包装工程。

Corresponding author: MENG Ling-dong (1981-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: packaging engineering.

引文格式: 马云飞, 朱军亮, 孟令东. 装备封存的环境质量与腐蚀在线监控的信息化管理技术[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 042-049.

MA Yun-fei, ZHU Jun-liang, MENG Ling-dong. Online Corrosion Monitoring Information Management of Storage Environmental Quality for Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(8): 042-049.

management systems via feedback control, such as temperature and humidity regulation, air filtration, and volatile corrosion inhibitor addition. The mentioned systems will benefit from early detection of breakage leaks and corrosion hazards of rust-proof packaging materials, thereby reducing the cost of manual inspections, and improving the efficiency of equipment maintenance.

KEY WORDS: equipment storage; atmosphere corrosion; on-line monitoring; information management; quality management; active warning

在装备物资的长期封存过程中,材料腐蚀以及电子元器件的老化失效是目前影响装备可靠性的最大困扰。由于装备需要满足跨地域、水陆交变环境、全天候的作战需求,装备材料面临的环境复杂,在高温高湿、盐雾沉积、霉菌附着等恶劣条件下,容易出现腐蚀失效^[1-2]。为了提高战备物资长期封存保养质量,实现封存环境的零锈蚀,必须采用高灵敏传感器来对封存环境的空气质量、大气污染物和空气凝露等导致的材料腐蚀进行在线监测^[3]。对于获取的海量在线监测信息,需要利用高通量技术,借助云数据库平台,整合装备材料所处的环境及自身的腐蚀信息,建立网络化、信息化、标准化管理体系。目的是帮助后勤保障部门实时掌握装备封存质量,为后续的维修保养提供指导,形成一套行之有效的反馈机制^[4]。

本文首先对影响装备长期封存保护的主要因素进行了分析,然后提出了几种主流的腐蚀在线监测技术。在此基础上,展望了仓储环境质量监控的网络化与信息化管理的发展方向,并提出了智能化的仓储封存质量监控管理系统的构想。

1 仓储环境的腐蚀因素

高湿环境是引起装备腐蚀的重要因素,尤其是在梅雨时节,空气中的水汽会在装备表面冷凝形成薄液膜。氧气溶解于薄液膜,并进一步渗入到装备表面。氧气作为去极化剂,在薄液膜的微环境内促进金属材料的氧化还原过程,在材料表面形成无数个微电池,在宏观上表现为点蚀特征。有统计表明,我国东南沿海地区的湿气较重,相对湿度超过 80% 的天数超过全年 1/2 的时间,而相对湿度超过 90% 的天数则占到全年的 1/4。有学者指出,当环境中相对湿度超过 70% 时,金属材料容易发生腐蚀^[5],而部分地区的空气湿度已远超这一临界值。因此,对于封存装备,要优先考虑在干燥环境中选址封存,并辅以循环干燥系统,将封存环境中的相对湿度降低到预警线以内,并实时监测湿度变化。

温度同样对材料腐蚀有重要影响。近年来,极端气候越来越频繁,部分地区的高温天气屡破历史极值,甚至出现连日超过 40 °C 的高温,而在装备表面的温度则可达到 60 °C 以上,这无疑会加剧装备材料的腐蚀。从微观角度讲,高温会加速分子的热运动,增加腐蚀介质与材料表面的接触机会,尤其是高温会

导致封存包装材料的过早老化破损,导致潮气和污染气体进入包装材料内,从而加速金属零组件的腐蚀。此外,在高低温交变环境中,由于湿气凝露,极易造成金属表面发生露点腐蚀。统计结果表明,当空气中的相对湿度超过腐蚀所需的临界湿度时,环境温度每升高 10%,材料的腐蚀速度约增加 1 倍^[6]。此外,高温还会引起特种装备的热应力蠕变,加速装备涂层的老化降解,以及精密电子元器件的失效等。对于高温引起的腐蚀,一般在封存仓库里安装循环降温系统,或是选址在山脚下,同时做好绿化工作,尽可能降低环境温度。

在适宜环境下,大量的真菌可在装备表面生长,形成大大小小的霉斑,其生命活动不仅能腐蚀装备材料的金属基体,还能降低材料表面惰性的有机或无机防护层的耐久性。霉菌的腐蚀机制目前主要分为酸蚀机制和氧浓差电池腐蚀机制 2 种^[7],前者是因为霉斑的代谢产物中含有大量有机酸,包括戊二酸、草酸、琥珀酸等,可以显著降低微环境介质中的酸度值。由此产生的活性 H^+ 能够穿透防护层,侵蚀入材料基体,作为阴极去极化剂,加速基体的电化学反应,同时 H^+ 的存在会导致材料发生应力腐蚀开裂。霉菌的氧浓差电池腐蚀机制则认为,霉菌属于好氧微生物,在代谢过程中会消耗大量氧气,造成生物膜下的局部微环境中缺氧,而成为阴极区,促进局部腐蚀的发生。针对霉菌腐蚀,普遍采用的做法是采用杀菌剂来进行灭菌^[8],同时也可以改善封存环境,调控环境参数如温度、湿度等,抑制霉变的产生及扩展。对于霉变引起的装备腐蚀已经引起业内人士的注意,国内外已先后发布多套标准,如 GJB 150. 10—86《军用设备环境试验方法霉菌试验》、GB/T 2423. 16—90《电工电子产品环境试验规程试验 J: 长霉试验方法》以及美国材料与试验协会 (ASTM) 的 G21-90 等。

在沿海地区或是在工业大气环境中,空气中会含有氯盐、硫酸盐以及铵盐等微小颗粒。在高湿环境下,这些盐颗粒溶解于水汽中,并在装备表面凝结,或是沉积在表面,形成盐颗粒。由于高价盐分会主动吸收水分,易形成高浓度盐溶液的液膜。在盐溶液微环境中,腐蚀性离子如 Cl^- 、 SO_4^{2-} 能快速扩散进入防护涂层,离子浓度的增加可以加速金属基材的电荷转移过程,进而促进防护层老化降解,材料腐蚀失效^[9]。为了规范对盐雾腐蚀的评级,国内外相继制定 GB/T 2423.17—93 中型盐雾试验标准 (NSS) 及 ASTM

B-117等。为了抑制盐雾腐蚀,在装备仓库的选址上要远离工业区和近海区,同时在仓库内配备循环空气系统,减少腐蚀性颗粒的沉积。

2 大气腐蚀在线监测技术

2.1 电化学腐蚀监测

装备物资的封存环境对其服役性能有着较大的影响,当前针对装备物资封存环境的温湿度和氧浓度监测已实现可视化和网络化。然而仅控制封存环境的

温湿度,并不能有效避免装备因霉菌和吸湿性粒子附着所产生的锈蚀问题,必须采用高灵敏度的腐蚀监测传感器对封存装备的锈蚀过程进行在线监测,对可能出现的腐蚀问题进行及时预警,从而提高装备物质的初期储存质量。基于不同的工作原理,目前的腐蚀监测传感器主要分为电化学法和物理法。

当前国内外采用的腐蚀监测传感器主要以电化学方法为主,包括电偶腐蚀电池^[10-12]、电化学阻抗^[13-15]、电化学噪声^[16-18]、微区电化学^[19-21]等。这些电化学基腐蚀监测传感器大都需要采用异种或同种材料的梳齿双电极,如图1所示。

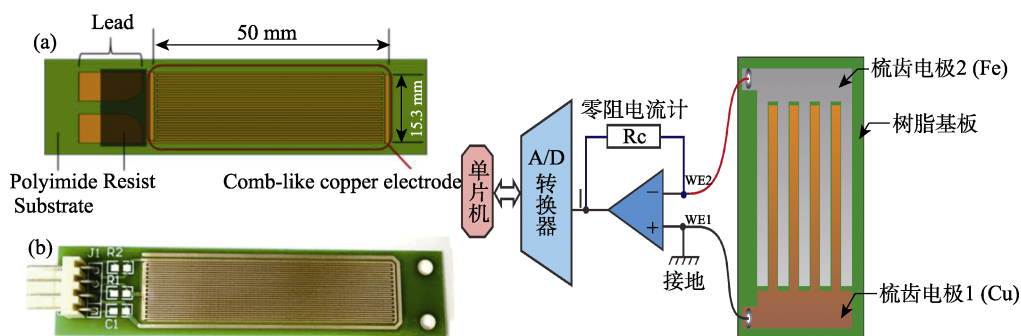


图1 典型异种和同种金属梳齿电极及测量电路

Fig.1 Schematic diagram of measurement circuit and typical metal comb electrodes

图1中,在大气吸附薄液膜下,梳齿金属电极表面形成导电回路,向对电极施加特定的电信号,可获取腐蚀信息如电偶电流、润湿时间、瞬时腐蚀速率等。电化学腐蚀监测传感器具有诸多优势,如对金属表面损伤小,响应时间快,且可以反映金属表面液膜变化和界面电化学信息,能够有效表征环境的腐蚀性,并揭示其腐蚀机理。Li等^[22]在我国6个不同的气候点,使用Fe/Cu型电偶腐蚀传感器对碳钢在1a内的大气腐蚀进行了连续监测,通过大数据技术对监测结果进行了收集分析,并建立随机森林模型预测了碳钢在不同气候环境下的腐蚀速率以及腐蚀因子的影响规律,如图2所示。

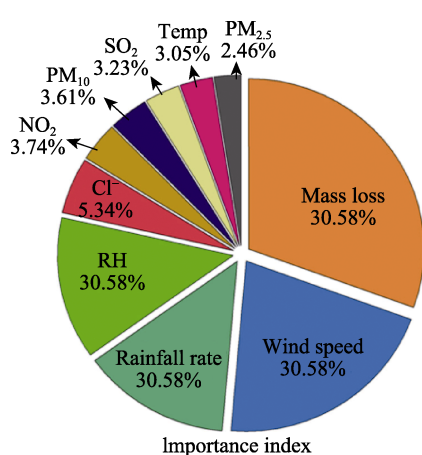


图2 腐蚀因素对碳钢大气腐蚀的重要性指数

Fig.2 Importance index of corrosion factors on atmospheric corrosion for carbon steel

然而,电化学测量的前提是电极表面必须有连续吸附薄液膜,UI辅助电极与工作电极时间建立导电通道,如图3所示。装备物资在相对湿度较低的封存气氛下,金属表面薄液膜呈现不连续岛状分布(如图3a所示),不能形成有效的导电通路。然而,在微液滴下,点状腐蚀或局部腐蚀仍在进行,但这个微区电流无法穿过两个电极之间,难以被外部的电流传感器测量到,因此无法准确测量微液滴下的局部腐蚀。只有在电极表面出现大量凝露时(如图3b所示),才能在两电极之间形成导电通道,不过由于电化学探头两电极之间的距离较小(<0.1 mm),所以过量的腐蚀产物在表面堆积,可能会造成物理短路,造成过大的腐

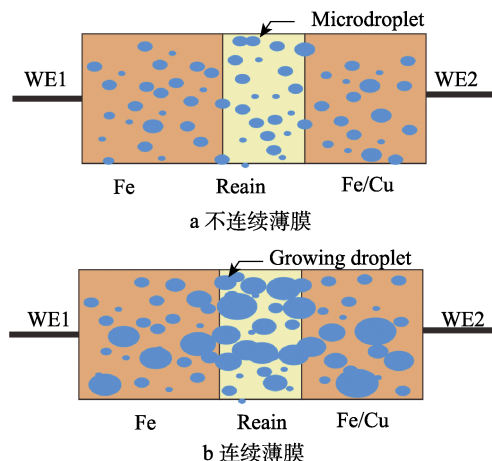


图3 双电极表面凝露对电极间导电通道的影响^[13]

Fig.3 Effects of condensation on conduction path of double electrode^[13]: a) discontinuous thin film; b) continuous thin film

蚀速率结果。因此, 电化学方法并不太适合封存环境内的大气腐蚀监测。

2.2 精密电阻探针

电阻探针腐蚀监测传感器^[23-26]通过实时监测金属电阻比值随腐蚀时间的变化, 并基于欧姆定律和数学积分法推算出金属腐蚀损失和腐蚀速率。电阻探针和测量电路如图 4 所示^[27]。由于其工作原理简单, 适用性强, 精度高, 自 20 世纪 50 年代起, 就被广泛应用于油气田^[28]、运输^[29]、文物保护^[30]等行业的腐蚀监测中。随着电子科学的不断发展, 其精度现已达到纳米级的灵敏度和分辨率。此外, 电阻探针探头表面无需形成连续薄液膜, 在低湿大气环境下也可直接测量金属的腐蚀速率, 相比电化学监测技术, 更适用于封存包装环境下的长期在线监测。目前, 电阻探针在腐蚀领域的研究主要集中在室内外环境因子对金属

腐蚀性能的影响机制。Li 等^[31]将物联网技术与电阻探针腐蚀传感器结合, 研究了 Q235 碳钢在户外的大气腐蚀, 发现腐蚀监测结果与已报道的实测数据基本吻合, 而且量化了环境因子对金属材料初期大气腐蚀的影响程度。Kouril 等^[32]通过电阻探针对于 2 个不同档案馆内的大气腐蚀进行在线监测, 并与 ISO 11844-2 标准测量进行了对比, 验证了其在原子级别 (0.1 nm) 上的检测灵敏度。当电阻探针表面有导电性腐蚀产物累积时, 会使腐蚀监测结果偏低, 而且电阻探针更倾向于监测金属表面发生均匀腐蚀的情况。Maija 等^[33]和桑邵雷等^[34]将电阻探针和失重挂片在污水环境中的腐蚀数据进行了对比, 在局部腐蚀状态下, 电阻探针所计算得到的腐蚀速率大约是失重法的 5 倍, 测量结果偏高。综上所述, 电阻探针腐蚀传感器由于其不受环境的限制和纳米级的分辨率, 在封存包装环境下的在线监测中有极大的应用前景。

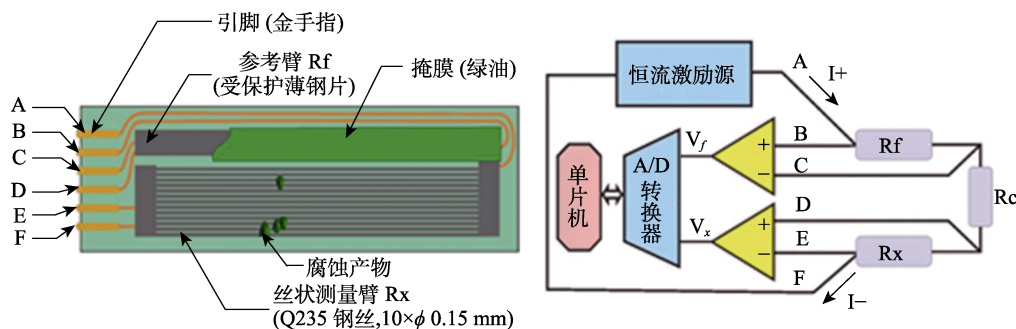


图 4 精密薄膜电阻探针和测量电路^[23]

Fig.4 Schematic diagram of precision thin film resistance probe and its measurement circuit^[23]

2.3 石英晶体微天平

石英晶体微天平腐蚀监测传感器^[35-39]是一种基于压电谐振原理实现对金属电极表面质量变化测量的仪器, 通常采用真空蒸镀技术在石英表面形成数百纳米厚的金属薄膜, 将交变电压信号加载到晶片两侧的金属膜上。由于压电效应, 石英晶片立刻开始震荡 (5~8 MHz), 当金属膜因氧化而质量增加时, 就会造成晶体振荡频率下降, 如图 5 所示。通过信号比较

器将正弦波调整为方波, 输入到频率计数器, 最后通过单片机进行去噪, 可以分辨 0.01 Hz 的频率偏移, 可原位监测大气环境中纳克级别的腐蚀质量增量, 具有极高的灵敏度。目前, 石英晶体微天平在腐蚀领域的研究主要集中在缓蚀剂分子的吸附^[40-41]或动态环境监测^[42]。Wan 等^[43]通过石英晶体微天平对镀铜晶片在缓蚀剂气氛中的吸附动力学过程进行了研究, 发现缓蚀剂呈现 Lagergren 吸附模型, 并探讨了温度和湿度等对缓蚀效率的影响机制。Yan 等^[44]将聚苯胺改

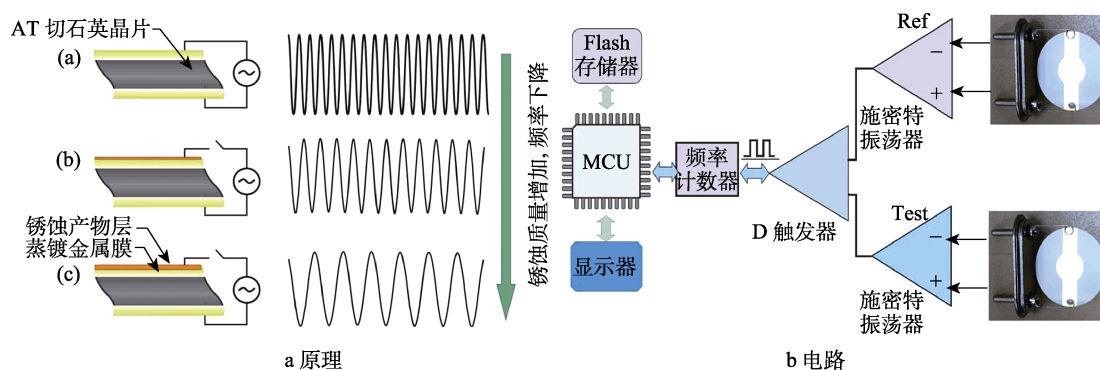


图 5 石英晶体微天平腐蚀监测技术的原理以及电路

Fig.5 Principle of quartz crystal microbalance corrosion monitoring (a) and its circuit diagram (b)

性的石英晶体微天平用于检测甲醛气体,结果表明,晶片的频移与甲酸气体的浓度呈线性关系,可用于博物馆文物的腐蚀监测,也表明石英晶体微天平传感器在低腐蚀性环境监测中具有广阔的应用前景。随着军用装备电子化、信息化程度越来越高,电路板上的元器件封装密度也越来越高,线宽也越来越小,纳克级的腐蚀就足以造成电子设备可靠性下降,而石英晶体微天平腐蚀传感器可有效满足战储环境质量的在线监测以及装备材料的失效预警。然而,石英晶体微天平仅适用于Cu、Ag或Sn等有色金属的腐蚀测试,对于黑色金属如钢铁等,由于无法蒸镀形成牢固的Fe膜,无法满足测量精度要求。

3 仓储环境管理的信息化

随着战备物资仓储系统的自动化和信息化技术的逐步应用,对于仓储环境的空气质量与锈蚀趋势的在线监测、预警和腐蚀防护技术也日益成熟。通过将各种腐蚀传感器、数据采集器、低功耗有线或无线收发器、数据服务器等组成区域性腐蚀监测物联网,并部署到装备封存库的关键位置,如发动机舱包装、精密电子组件包装内,实现仓储环境腐蚀性的连续在线

监测。当腐蚀速率接近设定的上限时,物联网中的服务器自动启动报警,实现战备物资封存环境无人值守的自动化与网络化监控。当监测某个区域的腐蚀风险提升到ISO 9223—2012标准规定的G3等级时,系统自动通知管理人员检查包装材料的破损情况,避免腐蚀加重。基于仓储空气质量与腐蚀风险自动监控、报警与气相缓蚀剂智能调控方案的配置如图6所示。

基于仓储封存环境全面腐蚀、局部腐蚀以及润湿时间传感器的监测数据,通过比例积分微分(PID)反馈算法,对物资封存环境实现实时监控。当封存环境的腐蚀性倾向增大时,增加气相缓蚀剂浓度;当传感器表面出现凝露时,自动将信号反馈给温湿度控制机组,快速调节空气的温湿度。通过空气除盐过滤、缓蚀剂加注和温湿度自动调节机制,实现战备物资封存环境无人值守的自动化与网络化监控,有效提升封存年限,降低人工成本。此外,可基于高分辨电化学测试技术在线监测材料的腐蚀电流,当装备封存的封套阻隔材料出现破损时,材料的腐蚀电流异常升高,从而判定装备封套阻隔材料的破损失效,可通过云端数据反馈到监测中心,对材料破损异常进行预警,提醒工作人员进行巡查修复。

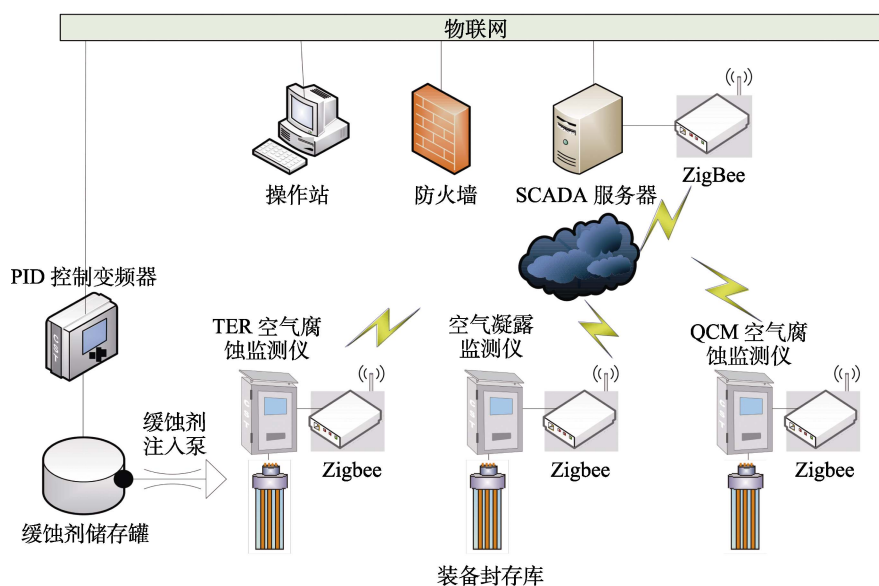


图6 基于物联网的仓储环境腐蚀与防护的自动监控管理系统

Fig.6 Automatic monitoring and management system for corrosion and protection of storage environment based on the internet of things

通过大量的腐蚀传感器和长期历史数据,利用高通量分析技术,对仓储环境的锈蚀规律进行动力学分析,建立这些环境因素对材料腐蚀过程影响的数学模型,如剂量-响应函数模型、多因素组合模型、响应面模型和类神经网络模型等^[45-46]。最终建立装备封存环境监测、腐蚀态势感知与材料服役寿命预警系统,为仓储物资封存的环境控制、维修保养和封存年限预测提供重要参考。

4 结语

为了保障装备的作战能力,实现封存装备的零锈蚀防护,形成一套仓储封存腐蚀性在线监测与智能防护系统,首先需要理清高温、高湿、盐雾、霉变和污染气体等恶劣环境因素下对装备材料腐蚀老化的影响。根据封存环境的腐蚀特点,可以采用除湿、除盐、除氧和缓蚀剂注入等多种措施来降低封存环境腐蚀

性,并合理选择在线监测传感器,在关键部位分布式布局,搭建仓储封存环境质量与腐蚀网络监控管理系统。通过可视化、智能化、集成化管理系统的实时反馈,有助于提高后勤保障部门对封存装备存储状态的掌控能力,对装备的腐蚀老化进行预警,同时可减少人工巡检的纰漏。基于物联网技术开发的装备环境监测系统,可以显著提高装备封存管理的自动化与信息化水平,进而提高战备物资长效存储质量,这也是未来信息化战争中装备封存技术的重要发展方向。

参考文献:

- [1] 张皓玥,张菲玥,钟勇,等. 装备的环境腐蚀效应抑制技术[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(3): 180-182.
ZHANG Hao-yue, ZHANG Fei-yue, ZHONG Yong, et al. Environmental Corrosion Effect and Control Techniques for Materiel[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(3): 180-182.
- [2] 庞留洋. 常规武器装备的腐蚀控制设计[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(6): 474-479.
PANG Liu-yang. Corrosion Control Design for Conventional Weapon Equipment[J]. Corrosion & Protection, 2018, 39(6): 474-479.
- [3] 梁来雨,李生,何利勇,等. 海洋工程装备腐蚀监测技术研究现状[J]. 全面腐蚀控制, 2020, 34(3): 29-33.
LIANG Lai-yu, LI Sheng, HE Li-yong, et al. Research Status of Corrosion and Inspection Technology for Marine Engineering Equipment[J]. Total Corrosion Control, 2020, 34(3): 29-33.
- [4] 杨世坚. 后勤车辆装备封存管理与实施研究[J]. 装备环境工程, 2006, 3(6): 70-73.
YANG Shi-jian. Study on Seal Packaging Management and Implementation in Logistics Vehicles and Equipments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(6): 70-73.
- [5] 杨晋涛,江鹏程,冯辅周,等. 装备封存用温湿度智能监控系统的设计与实现[J]. 包装工程, 2015, 36(21): 51-56.
YANG Jin-pu, JIANG Peng-cheng, FENG Fu-zhou, et al. Design and Implementation of Temperature-Humidity Intelligent Monitoring System for Seal Packaging of Equipment[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(21): 51-56.
- [6] 刘新佳. 舰载机载装备腐蚀防护对策[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2022, 40(2): 112-116.
LIU Xin-jia. Corrosion Control and Protection Countermeasures of Shipboard Airborne Equipment[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2022, 40(2): 112-116.
- [7] 张雨轩,陈翠颖,刘宏伟,等. 铝合金霉菌腐蚀研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(1): 13-21.
ZHANG Yu-xuan, CHEN Cui-ying, LIU Hong-wei, et al. Research Progress on Mildew Induced Corrosion of Al-Alloy[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2021, 41(1): 13-21.
- [8] 赵文静,江锦波,孟祥铠,等. 深海装备微生物腐蚀研究现状及发展趋势[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(3): 325-334.
ZHAO Wen-jing, JIANG Jin-bo, MENG Xiang-kai, et al. State of Art and Trend Prediction of Microbiologically Influenced Corrosion for Deep-Sea Equipment[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2019, 31(3): 325-334.
- [9] 赵朋飞,辛燕,孙颀,等. 装备关重件腐蚀-疲劳环境/载荷试验谱编制方法研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(10): 8-13.
ZHAO Peng-fei, XIN Yan, SUN Jie, et al. Study on Compiling Method of Corrosion-Fatigue Environment & Load Test Spectrum for Materiel Key Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(10): 8-13.
- [10] PEI Zi-bo, CHENG Xue-qun, YANG Xiao-jia, et al. Understanding Environmental Impacts on Initial Atmospheric Corrosion Based on Corrosion Monitoring Sensors[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 64: 214-221.
- [11] SHI Ya-nan, FU Dong-mei, ZHOU Xing-yu, et al. Data Mining to Online Galvanic Current of Zinc/Copper Internet Atmospheric Corrosion Monitor[J]. Corrosion Science, 2018, 133: 443-450.
- [12] HUANG Yan-liang, YANG Dan, XU Yong, et al. Field Study of Weather Conditions Affecting Atmospheric Corrosion by an Automobile-Carried Atmospheric Corrosion Monitor Sensor[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(9): 5840-5853.
- [13] WAN Shan, HOU Jian, ZHANG Ze-fan, et al. Monitoring of Atmospheric Corrosion and Dewing Process by Interlacing Copper Electrode Sensor[J]. Corrosion Science, 2019, 150: 246-257.
- [14] LI Chun-ling, MA Yuan-tai, LI Ying, et al. EIS Monitoring Study of Atmospheric Corrosion under Variable Relative Humidity[J]. Corrosion Science, 2010, 52(11): 3677-3686.
- [15] SCHINDELHOLZ E J, CONG H, JOVE-COLON C F, et al. Electrochemical Aspects of Copper Atmospheric Corrosion in the Presence of Sodium Chloride[J]. Electrochimica Acta, 2018, 276: 194-206.
- [16] 董泽华,郭兴蓬,郑家荣. 电化学噪声的分析方法[J]. 材料保护, 2001, 34(7): 20-23.
DONG Ze-hua, GUO Xing-peng, ZHENG Jia-shen. Review on Electrochemical Noise Analysis Methods[J]. Materials Protection, 2001, 34(7): 20-23.
- [17] 石维,董泽华,郭兴蓬. 基于Hilbert-Huang变换的电化学噪声解析及其应用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2014, 34(2): 138-146.
SHI Wei, DONG Ze-hua, GUO Xing-peng. Analysis of Electrochemical Noise by Hilbert-Huang Transform and Its Application[J]. Journal of Chinese Society for Corro-

- sion and Protection, 2014, 34(2): 138-146.
- [18] 余军, 张德平, 潘若生, 等. 井下含硫环空液中P110油管钢应力腐蚀开裂的电化学噪声特征[J]. 金属学报, 2018, 54(10): 1399-1407.
YU Jun, ZHANG De-ping, PAN Ruo-sheng, et al. Electrochemical Noise of Stress Corrosion Cracking of P110 Tubing Steel in Sulphur-Containing Downhole Annular Fluid[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(10): 1399-1407.
- [19] TOKUDA S, MUTO I, SUGAWARA Y, et al. Micro-Electrochemical Investigation on the Role of Mg in Sacrificial Corrosion Protection of 55mass%Al-Zn-Mg Coated Steel[J]. Corrosion Science, 2017, 129: 126-135.
- [20] 王雷, 孔小东, 苏小红, 等. 微区电化学方法在电偶腐蚀领域的应用[J]. 材料保护, 2020, 53(1): 157-163.
WANG Lei, KONG Xiao-dong, SU Xiao-hong, et al. Application of Micro-Area Electrochemical Method in the Field of Galvanic Corrosion[J]. Materials Protection, 2020, 53(1): 157-163.
- [21] 于阳, 卢琳, 李晓刚. 微区电化学技术在薄液膜大气腐蚀中的应用[J]. 工程科学学报, 2018, 40(6): 649-657.
YU Yang, LU Lin, LI Xiao-gang. Application of Micro-Electrochemical Technologies in Atmospheric Corrosion of Thin Electrolyte Layer[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(6): 649-657.
- [22] LI Qing, XIA Xiao-jian, PEI Zi-bo, et al. Long-Term Corrosion Monitoring of Carbon Steels and Environmental Correlation Analysis via the Random Forest Method[J]. Npj Materials Degradation, 2022, 6: 1.
- [23] WAN Shan, DONG Ze-hua, GUO Xin-peng. Investigation on Initial Atmospheric Corrosion of Copper and Inhibition Performance of 2-Phenyl Imidazoline Based on Electrical Resistance Sensors[J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 262: 124321.
- [24] MA Xiao-ze, MENG Ling-dong, CAO Xiang-kang, et al. Investigation on the Initial Atmospheric Corrosion of Mild Steel in a Simulated Environment of Industrial Coastland by Thin Electrical Resistance and Electrochemical Sensors[J]. Corrosion Science, 2022, 204: 110389.
- [25] 柏任流, 董泽华, 郭兴蓬, 等. 基于温度补偿的电阻探针腐蚀监测原理的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(5): 338-341.
BAI Ren-liu, DONG Ze-hua, GUO Xing-peng, et al. Study on Principle of Electrical Resistance Probe Based on-Temperature Compensation for Corrosion Monitoring[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2007, 19(5): 338-341.
- [26] LI Zhuo-lin, FU Dong-mei, PEI Zi-bo. Modeling Research of Initial Atmospheric Corrosion of Q235 Carbon Steel Based on Electrical Resistance Probe[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2021, 68(2): 45-52.
- [27] 柏任流, 董泽华, 郭兴蓬, 等. 基于温度补偿的电阻探针腐蚀监测原理的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(5): 338-341.
BAI Ren-liu, DONG Ze-hua, GUO Xing-peng, et al. Study on Principle of Electrical Resistance Probe Based on-Temperature Compensation for Corrosion Monitoring[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2007, 19(5): 338-341.
- [28] 张健, 吕瑞典, 李新勇, 等. 腐蚀监测技术在塔河油田生产系统的应用[J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(2): 170-171.
ZHANG Jian, LU Rui-dian, LI Xin-yong, et al. Application of Corrosion Monitoring Technology in the Production System of Tahe Oilfield[J]. Corrosion & Protection, 2010, 31(2): 170-171.
- [29] DILER E, PELTIER F, BECKER J, et al. Real-Time Corrosion Monitoring of Aluminium Alloys under Chloride-Contaminated Atmospheric Conditions[J]. Materials and Corrosion, 2021, 72(8): 1377-1387.
- [30] DUBUS M, KOURIL M, NGUYEN T P, et al. Monitoring Copper and Silver Corrosion in Different Museum Environments by Electrical Resistance Measurement[J]. Studies in Conservation, 2010, 55(2): 121-133.
- [31] LI Zhuo-lin, FU Dong-mei, LI Ying, et al. Application of an Electrical Resistance Sensor-Based Automated Corrosion Monitor in the Study of Atmospheric Corrosion[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2019, 12(7): 1065.
- [32] KOURIL M, PROSEK T, SCHEFFEL B, et al. Corrosion Monitoring in Archives by the Electrical Resistance Technique[J]. Journal of Cultural Heritage, 2014, 15(2): 99-103.
- [33] MARJA-AHO M, RAJALA P, HUTTUNEN-SAARIVIRTA E, et al. Copper Corrosion Monitoring by Electrical Resistance Probes in Anoxic Groundwater Environment in the Presence and Absence of Sulfate Reducing Bacteria[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 274: 252-261.
- [34] 桑绍雷, 李全民. 电阻探针与试片失重法在监测试验中的应用对比分析[J]. 全面腐蚀控制, 2014, 28(8): 46-49.
SANG Shao-lei, LI Quan-min. Comparative Analysis of Electrical Resistance and Corrosion Coupons for Corrosion Monitoring[J]. Total Corrosion Control, 2014, 28(8): 46-49.
- [35] KLEBER C, HILFRICH U, SCHREINER M. In Situ QCM and TM-AFM Investigations of the Early Stages of Degradation of Silver and Copper Surfaces[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(7): 3712-3721.
- [36] WADSAK M, SCHREINER M, AASTRUP T, et al. Combined In-Situ Investigations of Atmospheric Corrosion of Copper with SFM and IRAS Coupled with QCM[J]. Surface Science, 2000, 454-456: 246-250.
- [37] FUJII K, OHASHI K, HASHIMOTO T, et al. Atmospheric Corrosivity Estimation at Electrical Control Unit Room by Multichannel Quartz Crystal Microbalance Corrosion Sensors[J]. Materials Transactions, 2012,

- 53(2): 412-416.
- [38] DEBABHUTI N, NEOGI S, MUKHERJEE S, et al. Development of QCM Sensor to Detect A-Terpinyol Acetate in Cardamom[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 319: 112521.
- [39] WIESINGER R, SCHREINER M, KLEBER C. Investigations of the Interactions of CO₂, O₃ and UV Light with Silver Surfaces by in Situ IRRAS/QCM and Ex Situ TOF-SIMS[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(9): 2735-2741.
- [40] HE Zi-hao, GONG Shi-da, CAI Song-liang, et al. A Benzimidazole-Containing Covalent Organic Framework-Based QCM Sensor for Exceptional Detection of CEES [J]. *Crystal Growth & Design*, 2019, 19(6): 3543-3550.
- [41] WANG Di-hua, TANG Xiao, QIU Yin-yan, et al. A Study of the Film Formation Kinetics on Zinc in Different Acidic Corrosion Inhibitor Solutions by Quartz Crystal Microbalance[J]. *Corrosion Science*, 2005, 47(9): 2157-2172.
- [42] 周浩. 博物馆环境中典型氧化性气态分子污染物对银器文物腐蚀变色影响的评价研究[J]. *中国文化遗产*, 2015(3): 32-39.
- ZHOU Hao. Evaluation of the Influence of Typical Oxidizing Gaseous Molecular Pollutants in Museum Environment on the Corrosion and Discoloration of Silver Cultural Relics[J]. *China Cultural Heritage*, 2015(3): 32-39.
- [43] WAN Shan, MA Xiao-ze, MIAO Chun-hui, et al. Inhibition of 2-Phenyl Imidazoline on Chloride-Induced Initial Atmospheric Corrosion of Copper by Quartz Crystal Microbalance and Electrochemical Impedance[J]. *Corrosion Science*, 2020, 170: 108692.
- [44] YAN Ying, LU Dan-dan, ZHOU Hao, et al. Polyaniline-Modified Quartz Crystal Microbalance Sensor for Detection of Formic Acid Gas[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012, 223(3): 1275-1280.
- [45] ZHI Yuan-jie, JIN Zhi-hui, LU Lin, et al. Improving Atmospheric Corrosion Prediction through Key Environmental Factor Identification by Random Forest-Based Model[J]. *Corrosion Science*, 2021, 178: 109084.
- [46] YAN Lu-chun, DIAO Yu-peng, LANG Zhao-yang, et al. Corrosion Rate Prediction and Influencing Factors Evaluation of Low-Alloy Steels in Marine Atmosphere Using Machine Learning Approach[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2020, 21(1): 359-370.

责任编辑: 刘世忠