

化工设备腐蚀失效与安全寿命预测模型构建

李政

聊城鲁西多元醇新材料科技有限公司 山东聊城

【摘要】化工设备在长期运行过程中易受到腐蚀介质影响，导致结构劣化与失效，严重威胁工业安全与生产效率。针对腐蚀失效的多因素耦合特点，构建科学的安全寿命预测模型已成为提高设备可靠性与安全性的关键路径。本文围绕腐蚀机理、失效模式识别及预测方法展开研究，提出一种融合多源数据驱动与物理机制建模的寿命预测模型框架，为化工设备的寿命管理和风险控制提供理论依据与技术支撑。

【关键词】化工设备；腐蚀失效；寿命预测；数据驱动；可靠性评估

【收稿日期】2025年8月17日 **【出刊日期】**2025年9月20日 **【DOI】**10.12208/j.jccr.20250075

Construction of corrosion failure and safety life prediction model for chemical equipment

Zheng Li

Liaocheng Luxi polyol New Material Technology Co., Ltd. Liaocheng, Shandong

【Abstract】 During prolonged operation, chemical equipment is susceptible to corrosion media that cause structural degradation and failure, posing serious threats to industrial safety and production efficiency. Given the multi-factor coupling characteristics of corrosion-induced failures, developing a scientific safety life prediction model has become crucial for enhancing equipment reliability and safety. This study investigates corrosion mechanisms, failure mode identification, and predictive methodologies, proposing a framework that integrates multi-source data-driven approaches with physical mechanism modeling for life prediction. The proposed framework provides theoretical foundations and technical support for lifecycle management and risk control in chemical equipment systems.

【Keywords】 Chemical equipment; Corrosion failure; Life prediction; Data-driven; Reliability assessment

引言

化工行业设备常年运行在高温高压、强腐蚀等极端环境下，腐蚀成为导致设备失效的主要因素之一。设备一旦突发失效，会造成重大经济损失，还可能引发安全事故。开展腐蚀失效机制研究并建立科学的安全寿命预测模型，对于提升设备运行可靠性具有重要意义。本文引入多源数据分析与建模技术，探索腐蚀行为演化规律与寿命衰退路径，力求建立一套实用、准确的寿命预测方法体系，为化工设备的全生命周期管理提供决策支持。

1 化工设备腐蚀失效问题的多维特征分析

化工设备长期运行于高温、高压、强腐蚀等复杂环境中，其腐蚀失效问题呈现出显著的多维特征。这种失效并非单一因素导致，而是由材料特性、环境介质、运行工况与应力状态等多个变量相互作用而成。腐蚀介质如酸、碱、盐及有机溶剂等，在不同温度与流速下会

诱发均匀腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀开裂等多种失效模式。这种非线性和时变性表现为腐蚀速率的不均匀波动、局部环境的突变以及腐蚀形式的交替演化，导致传统的线性寿命预测方法难以准确反映设备实际服役状态，必须依赖更为复杂的建模技术与实时数据修正策略来实现有效预测与管理。

结构应力与腐蚀之间的耦合作用是设备腐蚀失效中不可忽视的关键因素。在焊接接头处、弯头、法兰等应力集中区域，若叠加环境腐蚀作用，将显著加快裂纹的萌生与扩展速度，导致设备发生应力腐蚀开裂或低周疲劳失效^[1]。不同材料对腐蚀的敏感性差异也决定了设备设计初期的选材策略对后期寿命影响深远。碳钢、不锈钢、合金钢及镍基合金等在相同环境下的腐蚀速率和失效模式差异较大，因此构建基于材料性能数据库与环境变量耦合分析的模型显得尤为重要，这对于实现腐蚀行为的准确识别和失效预警具有现实意义。

现代化工设备通常集成在连续生产流程中,系统耦合性强,这使得局部腐蚀失效可能引发系统性安全隐患。传统的定期检测与经验维护策略,已难以满足设备可靠性与经济性之间的平衡要求。为实现更高效的全生命周期管理,必须从腐蚀数据获取、运行状态监测、故障特征提取与寿命衰减建模等多角度出发,对腐蚀失效问题进行系统建模与预测。将物理机制与数据驱动方法相结合,可以揭示腐蚀发展的动态规律,还能为建立精细化的安全寿命预测模型奠定理论基础,从而提升整个化工系统的风险管控能力。

2 影响设备寿命的关键腐蚀机理与失效模式识别

影响化工设备寿命的腐蚀机理具有多样性与复杂性,不同腐蚀形态往往与设备的服役环境、材料类型及应力状态密切相关。在典型工况下,点蚀是常见的局部腐蚀形式之一,其特征是金属表面发生微小但深度可观的穿透性损伤,常见于含氯离子介质中使用的不锈钢设备中,一旦形成穿孔会迅速降低设备的密封性和承压能力。应力腐蚀开裂也是影响寿命的关键失效模式,该过程是在拉应力与特定腐蚀介质协同作用下引发裂纹的萌生与扩展,尤其在焊接热影响区和高残余应力区域表现显著。缝隙腐蚀常发生在螺栓连接、垫圈间隙等难以清洗的位置,因微环境中氧浓度差异而导致局部酸化,使腐蚀速率显著提升,对局部结构完整性形成威胁。

识别腐蚀失效模式需结合材料表征、断口分析、腐蚀产物检测等多手段协同诊断技术,微观形貌、金相结构以及元素组成的综合分析判断失效机制。晶间腐蚀的断口呈沿晶界断裂特征,常与材料热处理不当或铬贫化区域相关,若不及时识别将导致设备整体力学性能严重衰退^[2-6]。在复杂多相合金中,元素的选择性溶解也可能导致脱合金腐蚀,使金属骨架变得松散脆弱。疲劳腐蚀作为动态载荷与腐蚀介质共同作用的产物,在换热管、反应釜等周期运行设备中尤为常见,其裂纹通常起源于腐蚀缺陷区并随载荷循环逐步扩展,导致猝然断裂。建立高精度的失效模式识别系统是实现设备状态评估和剩余寿命预测的前提条件。

将腐蚀机理与实际失效模式建立有效关联,有助于识别寿命衰退的根本驱动因素,还能为预测模型提供基础数据支撑。现代传感器与监测技术的发展,使得腐蚀速率、表面电位、裂纹扩展行为等关键参数可以实现实时获取,为分析腐蚀发展路径与识别潜在失效风险提供依据。引入机器学习等智能算法,可将历史失效案例、腐蚀环境特征与设备结构参数进行多维建模,实

现腐蚀行为模式的自动分类与故障趋势预测,为构建动态、安全的寿命预测模型提供关键环节支撑,从而提高设备运行的可靠性和安全性。

3 安全寿命预测模型的构建与验证方法

构建化工设备的安全寿命预测模型,需要在深入理解腐蚀机理与失效行为的基础上,建立一个融合物理机制、环境参数与运行数据的多维数学表达体系。该模型应能描述设备在腐蚀环境中服役时的劣化演变过程,量化各类腐蚀因素对结构完整性与性能退化的贡献。在建模过程中,通常采用基于物理的寿命模型(PBM)与基于数据驱动的模型(DDM)相结合的方式。PBM侧重于建立材料损伤与时间、温度、应力、腐蚀速率之间的因果关系,适用于已知机理下的寿命预测,而 DDM 则对历史运行数据与失效案例的深度学习提取出潜在规律,能够适应复杂工况下的动态变化特征,从而实现更具泛化能力的预测性能。

在具体建模过程中,需要进行腐蚀行为的量化建模,常用方法包括采用幂律模型、Arrhenius 模型或断裂力学模型等描述设备壁厚损失速率、裂纹扩展速率等关键参数随时间演化的规律^[7]。模型中需考虑设备结构特征、材料属性及环境波动因素对预测结果的影响。反应釜、换热器等设备的复杂结构可能导致局部腐蚀速率远高于平均水平,若忽略这些差异,将显著降低模型的可靠性。为提高模型的精度,可引入贝叶斯推理方法或蒙特卡洛模拟对参数不确定性进行概率分析,从而实现基于风险的寿命预测。多物理场耦合模拟技术(如有限元分析与腐蚀电化学模型结合),可以进一步提高预测的空间分辨率和场景适应性,使模型更贴近设备的真实服役状态。

模型构建完成后,验证方法的科学性直接影响其工程可用性。常用验证手段包括实验对比验证、历史数据回归验证以及现场监测反馈验证。对已知腐蚀失效样本的寿命数据进行回测,评估模型预测结果与实际失效时间之间的偏差,进而修正模型参数,提升预测精度。在实际应用中,可部署在线监测系统采集温度、pH、电导率、腐蚀电流等运行数据,将其作为模型输入,实时更新设备剩余寿命预测值。最终,设定合理的安全寿命阈值,结合模型输出结果,指导设备的检修计划与替换周期,实现“由时间驱动向状态驱动”的维护策略转变,确保化工生产过程的本质安全与设备资产的最优利用。

4 预测模型在化工设备管理中的应用与优化路径

在化工设备全生命周期管理中,预测模型的应用

已成为提升运行安全性与维护效率的重要手段。将腐蚀失效行为数字化、模型化,可实现对设备状态的实时评估与寿命剩余时间的动态预测,为管理者提供基于数据支持的决策依据。在实际操作中,预测模型被广泛嵌入到化工装置的智能管理系统中,与工艺参数、运行历史、环境变量等多源信息的融合,实现对关键设备如储罐、换热器、反应器等运行状态的连续监控。一旦模型判断设备接近临界失效阈值,系统便可发出预警信号,引导运维人员提前干预,包括实施局部维修、更换易损部件或调整工况参数等措施,从而有效阻断故障链条的发展,避免突发性事故的发生。这种预测性维护机制提高了设备的可用性和稳定性,还显著降低了非计划停产带来的经济损失与人员安全风险,提升了整体运行管理的科学性与主动性。

应用过程中,模型的准确性与稳定性对设备管理效果具有决定性影响,因此优化路径的研究也成为关键环节之一。优化方向包括算法本身的改进,如采用集成学习、深度神经网络、自适应模糊推理等方法提升模型对复杂工况的适应能力,还涉及数据预处理、特征选择及样本平衡策略的系统优化^[8]。尤其在面对传感器数据缺失、工况扰动大等典型化工现场问题时,需引入鲁棒性强的建模技术,如迁移学习与主动学习方法,以提升模型的泛化能力与容错性。构建数字孪生系统,将物理实体与虚拟模型进行同步映射,可实现对设备腐蚀状态与运行行为的虚拟仿真,为预测模型的在线修正与实时优化提供新路径。

模型的实际价值最终体现在其对设备管理策略的变革推动上。将预测结果与风险评估模型联动,可实现基于风险的检维修(RBM)和基于状态的维护(CBM)模式替代传统的周期性维修方法。在多设备、多场景协同管理中,还可构建设备健康指数(EHI)体系,将不同模型输出结果进行标准化处理与综合评分,形成设备优先级排序与维护策略推荐机制,从而实现资源配置的最优化。随着工业智能化水平的提升,预测模型与设备管理系统的深度融合将不断推动化工行业朝向高

安全性、低成本、可持续化方向发展。

5 结语

本文围绕化工设备在腐蚀环境下的失效特征与寿命退化规律,系统探讨了腐蚀机理、失效模式识别方法以及安全寿命预测模型的构建与应用路径。多源数据融合与机理建模相结合,提出了具有工程适应性的预测思路,为设备状态评估与风险控制提供了理论支撑与实践依据。未来,随着监测技术与智能算法的发展,预测模型将在化工设备管理中发挥更加关键的作用,助力实现本质安全与全生命周期优化目标。

参考文献

- [1] 刘静.基于多相流模拟的输油管道内腐蚀规律研究[D].青岛理工大学,2025.
- [2] 蒙涛涛.跨断层在役油气腐蚀管道错动响应有限元研究[D].防灾科技学院,2025.
- [3] 陈豪.石油集输管路缩径式球阀冲蚀磨损研究及结构改进[D].盐城工学院,2025.
- [4] 崔悦,李玉凤,李伟,等.数字孪生在油气田地面系统的研究进展及展望[J].化工进展,2025,44(03):1194-1205.
- [5] 张佳琦.轨道交通杂散电流干扰区段埋地管道腐蚀失效预测研究[D].西安建筑科技大学,2024.
- [6] 周桂霞.钢制燃气管道冲蚀特性及失效分析[D].兰州理工大学,2024.
- [7] 靳桢.浮筒网式旋转过滤器的水力及过滤性能研究[D].新疆农业大学,2024.
- [8] 杨刚.三种新型高温炉管合金性能的研究[D].大连海洋大学,2024.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS