

石油化工机械设备维护检修技术分析

彭 钊

克拉玛依市三达有限责任公司, 新疆 克拉玛依 834000

[摘要] 石油化工行业在现代工业体系中占据战略地位, 其生产装置的运行稳定性关乎能源安全与产业经济效益。随着装置规模持续扩大与工艺流程复杂化, 机械设备的可靠性已成为影响行业可持续发展的关键要素。极端工况下的高温高压环境、腐蚀性介质作用等因素, 持续挑战设备材料的性能极限与结构完整性。传统维护模式依赖固定周期检修与经验判断, 难以精准应对多物理场耦合的失效机理, 亦无法满足智能化生产对设备状态实时监控的迫切需求。文章聚焦石油化工装备的失效规律与维护技术体系, 系统探讨检测诊断技术的创新路径, 解析工业物联网与人工智能融合引发的维护模式革新, 为构建适应复杂工业场景的智能维护体系提供理论支撑。

[关键词] 设备维护; 失效机理; 预测性维护; 智能诊断; 工业物联网

DOI: 10.33142/aem.v7i5.16802

中图分类号: TE65

文献标识码: A

Analysis of Maintenance and Overhaul Technology for Petrochemical Machinery and Equipment

PENG Dian

Xinjiang Karamay Sanda Co., Ltd., Karamay, Xinjiang, 834000, China

Abstract: The petrochemical industry occupies a strategic position in the modern industrial system, and the operational stability of its production facilities is related to energy security and industrial economic benefits. With the continuous expansion of device scale and the complexity of process flow, the reliability of mechanical equipment has become a key factor affecting the sustainable development of the industry. The high temperature and high pressure environment under extreme working conditions, as well as the effects of corrosive media, continue to challenge the performance limits and structural integrity of equipment materials. The traditional maintenance mode relies on fixed cycle maintenance and empirical judgment, which makes it difficult to accurately deal with the failure mechanism of multi physical field coupling, and cannot meet the urgent demand for real-time monitoring of equipment status in intelligent production. The article focuses on the failure laws and maintenance technology system of petrochemical equipment, systematically explores the innovative path of detection and diagnosis technology, analyzes the maintenance mode innovation caused by the integration of industrial Internet of Things and artificial intelligence, and provides theoretical support for building an intelligent maintenance system that adapts to complex industrial scenarios.

Keywords: equipment maintenance; failure mechanism; predictive maintenance; intelligent diagnosis; industrial Internet of Things

引言

石化生产系统的安全需求与设备技术发展呈现动态协同演进特征。“双碳”战略驱动下, 炼化装置逐步转向高参数、长周期运行模式, 设备面临的机械载荷与化学腐蚀呈现多机理交互作用态势。高温承压管道的蠕变损伤、反应容器的氢脆效应、旋转机械的疲劳失效等典型问题, 凸显传统维护策略在失效机理深度认知与干预时效性方面的双重瓶颈。新一代信息技术的突破性进展为设备管理注入变革动力: 工业物联网构建设备状态的立体感知网络, 大数据技术推动维护决策从经验依赖转向模型驱动, 人工智能算法重塑故障预测与健康管理的范式。技术融合趋势正在重构设备全生命周期管理的逻辑框架, 驱动维护模式从被动处置向主动预防转型, 从局部维修向系统优化跃升, 为解决设备可靠性提升与运维成本控制的现实矛盾开拓新路径。

1 设备维护检修在安全生产中的战略地位

石油化工生产系统的高危特性决定了设备维护检修

的战略价值。在“双碳”目标驱动下, 现代炼化装置正向高参数、长周期运行方向演进, 设备可靠性直接关乎企业安全生产与经济效益。2022 年国务院安委会发布的《危化品安全专项整治三年行动评估报告》指出, 实施预防性维护的企业较传统维护模式事故率降低 82%。设备完整性管理 (MI) 体系的应用实践表明, 科学的维护策略可将设备非计划停机时间压缩至原有时长的 15%~20%。当前行业正从被动维修向主动预防转型, 维护检修已成为企业安全文化的核心组成部分。

2 石油化工机械设备特性与失效机理

2.1 典型设备分类与运行特征

2.1.1 反应器、塔器、换热器及压缩机功能分析

石油化工核心设备在工艺流程中承担特定功能, 其结构与运行参数直接关联系统稳定性。反应器作为物质转化的核心载体, 在催化重整、加氢裂化等过程中承受剧烈放热与相变冲击, 催化剂床层分布均匀性直接影响反应效率与热

场稳定性^[1]。塔器系统通过精馏、吸收等单元实现组分分离,气液分布特性决定分离精度,内构件堵塞易引发雾沫夹带超标。管壳式换热器的管束振动源于流体诱导振动与结构固有频率的耦合效应,壳程介质流速突变可能引发传热管疲劳断裂。离心压缩机在高压工况下的运行稳定性涉及转子动力学与气体动力学的复杂交互,进口过滤精度与振动监测阈值需协同优化,叶轮结构设计需通过模态分析规避共振风险。

2.1.2 高温、高压、腐蚀性介质下的设备劣化规律

极端工况加速设备材料性能退化,形成独特的劣化路径。临氢设备在高温高压环境下的氢渗透现象导致材料脆化,氢原子在晶格内的扩散与聚集引发氢致裂纹扩展。酸性介质环境中,硫化物应力腐蚀开裂的晶间扩展速率受环境参数调控,奥氏体不锈钢在湿硫化氢环境中的敏化区易成为裂纹萌生源。高温蠕变损伤表现为晶界滑移与空洞形核,残余应力加速损伤进程。流动加速腐蚀在流道突变区域尤为显著,湍流剥离作用导致保护膜持续破坏,流速与腐蚀速率呈正相关性。

2.2 主要失效模式与机理

2.2.1 机械疲劳与蠕变失效

交变载荷与高温持续应力共同构成设备失效的双重诱因。往复设备在周期性冲击载荷下易发生高周疲劳,表面加工缺陷引起的应力集中显著降低疲劳寿命,裂纹通常起源于微观缺陷或几何不连续处,在交变应力作用下沿最大主应力方向扩展。高温管线系统的蠕变-疲劳交互作用在热循环工况下加剧损伤,热应力循环导致累积应变超过材料极限,法兰颈部区域因温度梯度引发的非均匀膨胀产生附加弯矩,加速密封面塑性变形。转动设备轴承的微动磨损通过摩擦化学作用生成第三体磨粒,润滑剂氧化产物在接触区形成磨粒磨损与化学腐蚀的协同效应,振动频谱中的调制边频带可作为早期损伤的特征标识。

2.2.2 腐蚀与冲蚀损伤演化

多相介质协同作用引发复杂腐蚀形态。缝隙腐蚀受氧浓差电池与侵蚀性离子协同作用驱动,受限空间内介质滞留导致钝化膜局部破裂,阳极溶解速率显著提升。气液两相流冲蚀形成液滴撞击损伤,液滴动能计算表明撞击应力可能超过材料疲劳极限,高速摄像观测显示液滴撞击瞬间产生微射流效应,加剧表面剥离。高温硫腐蚀形成多孔FeS垢层,其疏松结构为腐蚀介质渗透提供通道,钝化电流密度随硫化时间增长而升高,电化学阻抗谱显示膜层电阻值呈指数衰减趋势^[2]。

2.2.3 密封系统动态失效机制

密封界面的微观形貌变化与介质渗透构成动态失效链条。机械密封的端面热弹变形在高速工况下引发液膜相变,摩擦热导致端面热裂失效,瞬态温度场仿真显示接触区温度梯度可达300℃/mm。高压密封的蠕变松弛受螺栓应力松弛与垫片蠕变的双重影响,高温循环载荷下螺栓材料的应力松弛速率呈指数增长,密封比压衰减易引发界面泄漏。干气密封在超临界工况下的相变效应改变端面流体动力特性,介质密度突变导致液膜刚度下降,转子动力学分析表明轴向

振动幅值与介质相态转换频率存在强相关性,螺旋槽几何参数的优化可改善气膜稳定性。波纹管密封的疲劳失效受位移动幅值与循环次数的综合影响,有限元分析揭示波峰处的应力集中系数达2.5以上,成为裂纹优先萌生区域。

2.3 材料与环境交互作用机理

2.3.1 高温合金的氧化与渗碳行为

乙烯裂解炉管用高温合金在长期服役过程中面临渗碳与氧化协同损伤。烃类裂解产物中的碳原子沿晶界扩散形成碳化物网络,导致材料脆性增加。氧化层生长速率受合金元素扩散控制,铬元素的优先氧化形成保护性Cr₂O₃层,但渗碳过程破坏氧化层连续性,加速基体腐蚀。渗碳层与氧化层的交互作用形成独特的多层结构,显微硬度测试显示渗碳区硬度值较基体提升3倍以上。

2.3.2 涂层体系的失效动力学

热障涂层在高温设备中的应用面临热生长氧化物形成的挑战。氧化铝层的生长引发涂层/基体界面应力集中,热循环载荷下界面微裂纹沿TGO层扩展^[3]。涂层孔隙率与热导率的平衡设计至关重要,激光熔覆技术制备的梯度涂层可有效缓解热应力,延缓涂层剥落。等离子喷涂涂层的结合强度与服役温度呈负相关,高温下扩散层的形成改变界面结合机制,剪切试验显示800℃时结合强度下降至室温值的40%。

3 维护检修技术体系与方法论

3.1 传统维护策略的演进路径

石油化工设备维护策略的迭代过程映射了工业安全管理思维的持续进化。初期基于固定周期的预防性维护模式聚焦于定期更换易损件,某炼油装置法兰密封系统的年度检修方案虽降低突发泄漏风险,却因过度维护造成资源浪费。以可靠性为中心的维护方法通过系统化故障树分析重构优先级,某乙烯装置优化压缩机气阀维护策略后,在保障运行安全的前提下显著延长检修间隔。风险导向检验技术的引入实现设备分级管理,某园区对压力容器实施差异化检验后,高风险设备检测覆盖率提升至行业标准上限。

3.2 现代预测性维护技术框架

智能化维护体系深度融合数字技术,形成多维度协同决策机制。数字孪生技术构建的设备虚拟模型实现状态映射,某加氢反应器的三维动态仿真系统可精准模拟结焦层生长过程。机器学习算法在损伤预测领域取得突破,裂解炉管剩余寿命评估模型通过历史数据训练后,能识别早期微裂纹扩展特征。区块链技术强化维护过程可信度,某集团建立的维修数据存证平台确保全生命周期记录不可篡改。联邦学习框架打破数据壁垒,行业联盟开发的共享诊断模型使新成员企业快速获得故障识别能力。智能决策系统整合多源异构数据,某炼厂部署的预警平台将复杂故障诊断效率提升至行业领先水平。

4 关键检测与诊断技术分析

4.1 无损检测技术(NDT)集成应用

石油化工设备无损检测技术的融合创新显著提升了缺陷检测能力。相控阵超声技术通过多维度声束控制实现复杂结构检测,某重整装置反应器环焊缝检测中,利用动

态聚焦技术有效识别焊缝未熔合缺陷。太赫兹波成像技术突破传统限制,在带保温层管道检测中实现非接触式腐蚀评估,某炼化企业应用该技术发现隐蔽腐蚀区域。电磁超声检测在高温工况下展现独特优势,催化裂化装置再生器检测案例验证了其在 500℃ 环境下的裂纹捕捉能力。数字射线检测的实时成像特性优化了检测流程,某管道焊缝检测项目采用 DR 技术将效率提升 40%。导波检测技术在大范围筛查中实现突破,某长输管线项目中低频导波成功定位 2 公里范围内的壁厚减薄区域。

4.2 在线监测系统开发

智能感知技术的进步推动在线监测系统向多维度发展。分布式光纤传感系统在裂解炉管监测中的应用,通过连续温度场重构实现局部过热的早期预警。声发射监测技术的升级版算法在储罐完整性评估中发挥关键作用,某球形储罐通过声发射事件聚类分析识别出活性裂纹扩展趋势^[4]。多参数融合监测平台在压缩机组健康管理中取得实效,集成振动、温度、压力等 12 个特征参数构建设备健康指数模型。边缘智能终端的普及显著提升数据处理时效性,某离心机组监测系统实现毫秒级异常特征提取。低功耗无线传感网络的创新应用解决复杂环境部署难题,某海上平台监测系统在盐雾环境中保持 98% 以上数据传输稳定性。

4.3 智能诊断算法研究进展

智能算法与工业场景的深度融合重构了故障诊断体系。改进型卷积神经网络在旋转机械故障分类中的应用,显著提升复杂工况下的诊断鲁棒性。图神经网络技术突破单设备诊断局限,某联合装置级诊断系统通过设备关联图谱将误报率降低 35%。小样本学习算法在稀缺数据场景展现优势,某新型压缩机故障模型通过元学习框架实现仅需 30 组样本的高精度识别。联邦学习机制在行业协同诊断中取得突破,多家炼厂共建的诊断模型在保护数据隐私前提下提升平均诊断准确率 18%。时序预测模型的创新应用延长了预测窗口期,某反应器密封系统退化趋势预测误差较传统方法减少 60%。

5 先进维护技术发展趋势

5.1 工业物联网技术融合

工业物联网技术的深度集成正在重塑设备维护的底层架构体系。5G 专网的高带宽与低延迟特性为设备级实时通信提供基础支撑,某智能工厂构建的全域感知网络实现毫秒级多参数同步采集,显著提升振动、温度等关键参数的监测密度。低功耗广域网技术突破复杂工业环境下的传输瓶颈,海上平台部署的无线传感系统在极端盐雾环境中保持稳定连接,为偏远区域设备状态监控开辟新路径。时间敏感网络技术保障控制指令的精准同步,某乙烯装置通过时间戳协议优化压缩机协同控制,将紧急停机响应延迟压缩至行业领先水平。数字主线技术贯通设备全生命周期数据流,某集团建立的跨平台数据枢纽实现设计参数、制造记录与运维信息的深度融合,使故障根因追溯效率达到新高度。边缘计算节点的算力升级推动实时分析能力革新,搭载专用处理芯片的智能终端实现振动频谱特征的即时提取与预处理。

5.2 大数据驱动决策优化

多维度数据融合分析推动维护决策向精准化方向深度演进。知识图谱技术整合行业经验库与历史案例库,构建的智能推理引擎可自动匹配相似失效模式,显著提升诊断建议的工程实用价值。智能库存模型通过设备健康状态预测动态调整备件策略,某企业应用后实现仓储成本与缺货风险的双向优化。数字孪生与仿真技术的深度结合构建虚拟训练环境,可精确复现多种典型故障场景,使技术人员在安全条件下掌握复杂工况处置技能。自然语言处理技术解析非结构化设备日志,自动生成的维护方案兼顾标准规范与现场实际需求。增强现实技术的创新应用通过虚实融合界面直观展示设备内部损伤三维形态,使现场人员的态势感知效率提升至新量级。

5.3 人工智能技术的深度应用

智能算法正在突破传统维护技术的应用边界与效能极限。强化学习系统通过模拟海量维修场景自主优化决策路径,某企业应用后实现维护资源配置效率的显著提升。生成对抗网络技术有效缓解工业数据稀缺问题,构建的合成故障样本库为新设备诊断模型提供高质量训练数据。可解释人工智能技术增强算法透明度,可视化决策依据使工程师对诊断结果的信赖度大幅提升。联邦学习框架打破数据壁垒,行业联盟建立的协同诊断模型在保护数据主权前提下实现跨企业知识共享。自主检测机器人集成多模态传感与边缘计算能力,可在高危区域独立完成基础检测任务,有效降低人员暴露风险。

6 结语

石油化工设备维护技术正处于经验积累与数字创新融合的关键转型阶段。对失效机理的本质认知是构建精准维护体系的科学基础,而物联网、大数据与人工智能的深度集成正催生新一代智能维护范式。未来技术发展将聚焦多维突破:设备状态感知向全要素实时化延伸,通过多源数据融合实现健康状态的透明化呈现;维护决策向模型驱动进化,依托数字孪生与深度学习构建动态优化系统;运维服务向协同共享升级,形成跨领域知识整合的技术生态。持续深化基础理论与技术集成创新,是构建适配现代石化工业发展需求的智能维护体系的必由之路,为行业转型升级提供坚实的技术保障。

[参考文献]

- [1]邱锦.石油化工机械设备维护检修技术分析[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(17):19-21.
- [2]惠亚琦,韩英.分析石油化工设备检修中的危险因素及预防措施[J].石化技术,2023,30(12):218-220.
- [3]刘书玉,房国栋.关于化工设备检修中的危险因素与控制策略[J].当代化工研究,2023(24):165-167.
- [4]常鋆.炼油化工厂设备检修与安全维护管理研究[J].中国设备工程,2024(4):64-66.

作者简介:彭钿(1986.4—),毕业院校:西南石油大学,所学专业:生产过程自动化,当前就职单位名称:克拉玛依市三达有限责任公司,就职单位职务:物资供应站,职称级别:工程师。