

化工机械设备故障原因分析及维护管控措施研究

张俊文

中盐内蒙古化工股份有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i1.22248

[摘要] 化工机械设备是现代化工生产的物质基础,其运行可靠性直接关乎生产安全与经济效益。然而,设备长期服役于高温、高压、腐蚀等极端工况,故障频发问题突出。本文系统梳理了化工设备的主要类型与运行特征,深入分析了典型故障模式及失效机理,从设计制造、安装施工、运行操作、维护检修及管理五个层面逐层剖析故障根源。在此基础上,提出了以风险分级管控为核心、以状态监测为支撑、以全生命周期管理为框架的综合维护策略体系。研究表明,实现从事后维修向预测性维护的转变,构建制度化、标准化、智能化的设备管理体系,是提升设备可靠性的关键路径。

[关键词] 化工机械设备; 故障模式; 失效分析; 预测性维护; 全生命周期管理

中图分类号: TQ050.7 文献标识码: A

Research on Failure Cause Analysis and Maintenance Management and Control Measures for Chemical Machinery and Equipment

Junwen Zhang

CNSIG Inner Mongolia Chemical Industry Co., Ltd.

[Abstract] Chemical machinery and equipment constitute the material foundation of modern chemical production, and their operational reliability is directly related to production safety and economic benefits. However, equipment operating under extreme conditions such as high temperature, high pressure, and corrosion for extended periods is prone to frequent failures. This paper systematically reviews the major types and operating characteristics of chemical equipment and provides an in-depth analysis of typical failure modes and failure mechanisms. The root causes of equipment failures are examined from five aspects: design and manufacturing, installation and construction, operation, maintenance and overhaul, and management. On this basis, a comprehensive maintenance strategy system is proposed, centered on risk-based classification and control, supported by condition monitoring, and structured around life-cycle management. The study shows that shifting from reactive maintenance to predictive maintenance and establishing a systematic, standardized, and intelligent equipment management system are key pathways to improving equipment reliability.

[Key words] chemical machinery and equipment; failure modes; failure analysis; predictive maintenance; life-cycle management

引言

化工行业具有高温高压、易燃易爆、连续化作业等显著特征,设备安全稳定运行至关重要。关键设备的非计划停机不仅造成巨大经济损失,还可能引发安全事故和环境污染。因此,深入研究设备故障原因并制定有效维护措施,具有重要的理论价值和现实意义。当前,尽管国内外在故障诊断和维护管理领域取得了丰富成果,但系统整合故障机理分析与全生命周期策略的研究仍待深化。本文以此为切入点,构建从故障根源辨识到维护策略优化的完整框架,为化工企业设备管理提供参考。

1 化工机械设备主要类型与运行特征

1.1 典型化工机械设备的分类

化工机械设备按功能分为若干大类。流体输送设备包括离心泵、往复泵、齿轮泵及各类压缩机与风机,实现物料定向移动与增压。传热设备以管壳式换热器、板式换热器、再沸器和冷凝器为代表,承担加热、冷却及相变热交换。传质与分离设备涵盖精馏塔、吸收塔、萃取塔等塔器,用于多组分分离提纯。反应设备是化工核心装备,有搅拌釜式、固定床式、流化床式反应器,内部进行复杂物理化学反应。此外,储存设备(球罐、卧罐、常压储罐)和过滤干燥设备亦占据重要地位。各类设备结构差异显著,故障模式各不相同,分类研究是故障分析的基础。

1.2 化工设备的服役环境与工况特征

化工设备服役于极端复杂的环境。高温条件下,许多反应在数百摄氏度进行,炉管壁温可达1000℃以上,易导致材料蠕变和组织劣化。高压环境如加氢反应器、氨合成塔压力可达数十兆帕,对强度和密封性要求极高。腐蚀性介质普遍存在,包括无机酸、有机酸、硫化氢等,可造成均匀腐蚀、点蚀、晶间腐蚀乃至应力腐蚀开裂。含固体颗粒的介质在流动中产生冲刷磨损。交变载荷易引发热疲劳和机械疲劳。这些因素往往相互耦合、相互促进,显著增加了设备故障的风险与复杂性^[1]。

1.3 化工设备全生命周期概述

化工设备全生命周期涵盖设计选型、制造加工、运输安装、运行使用、维护检修和报废更新六个阶段。设计阶段,材料选择、结构设计和安全裕度决定先天可靠性。制造阶段涉及铸造、焊接、热处理等多道工序,质量缺陷可能埋下隐患。安装不当可造成初始损伤或偏差。运行使用是老化损伤累积的主要时期,操作规范性至关重要。维护检修是发现缺陷、恢复性能的关键环节。报废更新需基于技术经济评估决策。全生命周期管理强调各阶段信息传递与反馈,将运行数据回馈至设计和制造环节,形成闭环优化机制。

2 化工机械设备故障模式与机理分析

2.1 故障的基本概念与分类

设备故障是指设备或其零部件丧失规定功能的状态。按故障发展速度可分为突发性故障和渐进性故障,前者由偶然因素触发,后者是性能逐渐劣化的结果。按功能丧失程度可分为完全故障和局部故障。按可观测性可分为功能性故障和潜在性故障。经典的浴盆曲线将设备故障率随时间的变化划分为早期故障期、偶然故障期和耗损故障期三个阶段,分别对应制造缺陷、随机事件和老化劣化等不同主导因素。理解故障的分类体系和演化规律,是开展故障诊断和维护决策的重要理论基础。

2.2 典型故障模式统计与特征

对化工设备故障的统计研究表明,不同设备具有不同的主导故障模式。在旋转机械中,轴承损坏和轴系故障占比最高(约30%~40%),其次为密封泄漏(20%~30%)和转子不平衡/不对中(10%~15%)。离心泵的机械密封泄漏是最常见的具体故障形式。换热器的主要故障模式是管束泄漏和管外结垢,其中腐蚀穿孔和管端焊缝开裂最为突出。压力容器和反应器的主要故障模式包括壁厚减薄、局部点蚀、应力腐蚀开裂及焊缝裂纹扩展,其中应力腐蚀开裂最为危险。塔设备的故障集中于塔盘损坏和降液管堵塞^[2]。统计分析还发现,约50%的故障与腐蚀相关,约25%与机械疲劳和磨损相关,其余与操作失误、材料缺陷和维护不当有关。

3 化工机械设备故障原因的系统性分析

3.1 设计制造层面的原因

设计和制造阶段的缺陷是设备故障的先天根源,选材不当直接缩短设备寿命,如含氯离子环境中选用奥氏体不锈钢易引发应力腐蚀开裂。结构设计不合理造成局部应力集中,过渡圆角

过小、开孔补强不足等位置成为疲劳裂纹优先萌生地。热膨胀考虑不周导致高温下热应力过大,严重时可拉裂焊缝。制造工艺方面,焊接缺陷(未焊透、气孔、夹渣)、热处理不当产生的残余应力与组织劣化、加工精度不足等问题均为常见质量隐患。另外,清洁度控制不到位使铁屑、焊渣等异物残留,运行中造成划伤或堵塞,引发次生故障。

3.2 安装施工层面的原因

安装施工的质量控制直接影响设备的初始状态和使用寿命,安装对中误差是旋转机械最常见的问题,联轴器对中偏差过大会造成附加交变载荷,使轴承过热、轴封加剧磨损,严重时导致断轴事故。基础施工质量不合格,如基础强度不足、二次灌浆不密实,将导致运行中产生异常振动和基础沉降。管道安装的应力问题容易被忽视,管道与设备接口强制对口会使接管承受过大的附加载荷,加速焊缝疲劳开裂。安装过程中的清洁度控制也是重要环节,管路清洗不彻底、系统内残留切屑,在试运行阶段会造成轴承和密封面的严重划伤。压力试验和泄漏试验操作不规范,既可能对设备造成损伤,也可能遗漏重要的初始泄漏点。

3.3 运行操作层面的原因

运行操作阶段的规范性对设备寿命具有决定性影响,超温超压运行是最常见的操作偏差,温度每升高10℃,腐蚀速率可能增加1~3倍,超压则直接威胁强度安全。介质成分的波动同样不容忽视,原料中杂质的异常升高可使腐蚀环境骤然恶化,迅速引发局部腐蚀穿孔。开停车过程中的温度、压力和流量变化速率控制是关键,变化过快会产生过大的应力循环和疲劳损伤。部分操作人员对设备原理和规程理解不深,在异常工况下处置不当,如泵在关闭出口阀状态下长时间运行导致密封干磨损坏,压缩机发生喘振时未能及时处理而损坏转子。操作记录不规范导致异常信息无法有效传递,也是运行管理中的常见缺陷^[3]。

3.4 维护检修层面的原因

维护检修本身也可能成为故障的诱因,维护计划不合理是普遍问题,过度维护在拆装中可能引入新损伤,维护不足则使劣化状态得不到及时治理。检修质量不达标尤为突出,如轴承安装加热温度过高导致回火软化、密封端面研磨不平整造成安装后即泄漏、螺栓紧固力矩不规范造成法兰接头泄漏。备品备件质量控制薄弱,不合格备品备件的使用严重缩短了维修后的可靠运行周期。状态监测手段的缺失使维护人员无法准确把握设备状态,仅凭经验判断检修时机,容易造成“该修不修、不该修乱修”。检修后验收和试运行流于形式,遗留的安装缺陷可能在后续运行中暴露并造成更严重后果。

3.5 管理层面的深层原因

管理层面的问题是设备故障的深层根源,设备档案和台账管理混乱,出厂资料、安装记录和检修报告不完整,无法对设备全生命周期状态进行追溯分析。故障数据积累不足,小故障和异常工况未被系统记录和归类,即使有记录也未进行根因分析,同类故障反复发生而得不到根除。维护人员配置和培训不足,一方面数量难以满足日常巡检要求,另一方面技能培训滞后,对新设

备、新技术的掌握不够。在经营压力下,企业往往压缩维护预算,减少备件储备、降低检修标准、推迟设备更新,这种短视行为显著增加了非计划停机风险。设计、生产、维护、安全等部门之间沟通协调不畅,信息孤岛阻碍了设备问题的及时发现和闭环处理。

4 化工机械设备维护管控策略

4.1 维护管理理念的演进

设备维护管理理念经历了从低级到高级的演化,事后维修是在故障发生后进行修理,适用于非关键设备,其优点是简单,缺点是停机损失大。预防维护以固定周期进行定期检修,能避免部分突发故障,但存在维护过剩和不足并存的问题。以可靠性为中心的维护基于故障模式和可靠性分析,针对不同部件选择最适用的策略组合。全员生产维护则从组织角度强调全员参与,追求设备综合效率最大化。预测性维护代表了前沿方向,依托在线监测和数据分析,根据设备实际健康状态动态确定维护时机,能在故障前发出预警并指导精准维修。这四种理念应根据设备类型和关键程度选择适用的组合策略^[4]。

4.2 基于风险的设备分级管控

基于风险的设备分级管控,其核心是根据设备故障对安全、环境、生产的影响后果,结合故障概率进行风险评估和等级划分。通常将设备分为A、B、C三级:A类为关键设备,故障会造成人员伤亡、重大环境污染或生产全停,需配备在线监测和冗余备用;B类为重要设备,故障会造成较大产量损失,需定期监测和计划检修;C类为一般设备,故障后果可控,可采用事后维修。风险矩阵方法将后果等级与概率等级组合,定量确定风险等级,为差异化维护策略提供依据。这一方法实现了维护资源从“平均分配”向“重点倾斜”的优化配置。

4.3 状态监测与故障诊断技术

振动监测是旋转机械最有效的监测手段,通过分析振动信号可识别转子不平衡、不对中、轴承故障等多种模式。油液分析通过对润滑油样的理化指标检测和磨损颗粒分析,判断油品劣化程度和摩擦副磨损状态。红外热成像可非接触检测表面温度分布,发现换热器堵塞、衬里破损等热异常。超声波测厚用于在线监测壁厚减薄动态。腐蚀监测技术包括电阻探针、线性极化探针等,可实时反映介质腐蚀性变化。故障诊断方法已从单纯阈值报警发展为基于数据驱动(机器学习)和基于模型(数字孪生)的智能诊断,诊断准确率显著提升。

4.4 预测性维护体系的构建

预测性维护体系建设需从数据采集、状态评估、趋势预测到维护决策形成完整闭环。首先,建立设备状态基准值体系,对关键参数在健康状态下确定基准值和正常波动范围。其次,构建

多参数融合的状态评估模型,将单一阈值判断升级为综合健康指数评价。趋势预警利用趋势外推或机器学习算法,预测劣化到达阈值的时间,为维护计划预留准备窗口。当预测需干预时,维护决策系统结合备件库存和生产计划,优化确定检修时间和范围。预测性维护的有效运行依赖于完善的数据管理平台和专业人才队伍,实施宜采取“先试点、后推广”的策略。

4.5 全生命周期设备管理框架

全生命周期管理的核心目标是实现设备全生命周期成本最小化,在设计选型阶段推行可靠性设计,运用FMEA方法在设计时识别潜在失效模式并改进。采购阶段重视制造过程的监造和质量见证^[5]。安装调试阶段严格执行验收规范,做好初始状态数据采集。运行维护阶段建立完善的设备台账和故障数据库,将巡检、维修数据电子化归档,形成“健康档案”。运行后期基于剩余寿命评估和经济分析,科学制定继续运行、大修更新或更换的决策方案。最关键的是建立信息闭环反馈机制,将运行中发现的共性设计问题反馈到新一轮选型决策中,实现管理持续优化。

5 结束语

化工设备故障管理是涉及技术、组织和文化的系统工程。本文从故障机理入手,逐层剖析设计制造、安装施工、运行操作、维护检修和管理五个层面的原因,揭示设备故障多因素耦合的特征。在此基础上提出融合风险分级、状态监测、预测性维护和全生命周期管理的综合对策。提升管理水平关键在于三个转变:策略转向预测性维护,对象转向全生命周期,方式转向数据驱动。随着物联网和人工智能发展,设备管理正向数字化智能化演进,有望根本变革传统维护模式,提升化工生产的安全性和经济性。

【参考文献】

- [1]袁东升.化工机械设备故障诊断与预测方法[J].清洗世界,2024,40(12):193-195.
- [2]杨丽颖.化工机械设备故障原因和故障维修分析[J].中国设备工程,2024(22):150-152.
- [3]赵渊博.化工机械设备故障与事故管理探讨[J].化纤与纺织技术,2022,51(11):71-73.
- [4]贾金剡.化工机械设备故障分析及维修管理措施[J].当代化工研究,2023(6):160-162.
- [5]卢耀朝.化工机械设备故障分析及维修管理措施探索[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(24):28-30.

作者简介:

张俊文(1987--),男,汉族,甘肃人,本科,中级工程师,研究方向:机械工程。