

化工机械全生命周期安全管理模式创新研究

徐海龙

甘肃能化金昌能源化工开发有限公司 甘肃金昌 737000

摘要：化工机械的安全管理对化工生产的稳定运行至关重要。本文基于全生命周期理论，针对化工机械设计、制造、安装、运行、维护、报废各阶段的安全管理痛点，构建了一体化创新管理模式。通过整合本质安全设计、全流程质量管控、智能监测运维等手段，结合甘肃能化金昌公司的实际案例，实现了化工机械安全风险的全周期管控。实践表明，该模式可使设备安全事故率下降40%，维护成本降低25%，为化工行业设备安全管理提供了可借鉴的路径。

关键词：化工机械；全生命周期；安全管理模式创新

化工行业具有高温、高压、易燃、易爆、强腐蚀等特点，化工机械作为生产核心装备，其安全状况直接关系到企业的安全生产和经济效益。近年来，因化工机械故障引发的安全事故频发，据应急管理部统计，2022年全国化工设备相关事故占化工事故总量的35%，其中因设计缺陷、维护不当导致的事故占比超60%。因此，构建全生命周期的化工机械安全管理模式，对提升化工企业本质安全水平具有重要的现实意义。甘肃能化金昌能源化工开发有限公司作为西北地区重要的能源化工企业，拥有多套煤化工、盐化工装置，其化工机械种类繁多、工况复杂，在设备安全管理方面面临诸多挑战，如设备腐蚀严重、运维效率低下等，这些问题也为本文的研究提供了典型场景。

一、化工机械全生命周期安全管理的理论基础

（一）全生命周期管理理论

全生命周期管理是指对产品从设计、制造、使用到报废的整个生命周期进行系统规划与控制。对于化工机械而言，其全生命周期涵盖设计阶段（方案设计、施工图设计）、制造阶段（材料采购、加工组装）、安装阶段（现场吊装、调试）、运行阶段（生产操作、状态监测）、维护阶段（检修、保养）、报废阶段（拆除、环保处置）。各阶段相互关联，前一阶段的决策会对后续阶段的安全性能产生直接影响^[1]。

（二）化工机械的特殊性

化工机械需适应化工介质的强腐蚀性，如硫酸装置的换热器需采用耐硫酸腐蚀的双相钢；需承受高温高压工况，如煤化工气化炉操作温度超900℃、压力达5MPa，尿素合成塔设计压力达16.4MPa，这些特殊性要求其安全管理必须贯穿全生命周期，在设计阶段就考虑材料耐

蚀性、结构强度等本质安全因素，在运行阶段强化腐蚀、疲劳等风险的监测。

二、化工机械全生命周期安全管理现状及问题

（一）设计阶段：本质安全考量欠缺

部分化工机械设计仅聚焦功能实现，未充分兼顾全生命周期的安全维度。例如某化工厂的盐酸储罐，设计时未对介质长期腐蚀的累积效应进行系统评估，投用仅5年便出现壁板穿孔，引发盐酸泄漏事故。调研数据显示，约40%的化工设备早期故障根源可追溯至设计阶段的安全缺陷，如材料耐蚀性匹配失误、结构强度冗余不足、安全联锁设计缺失等，为设备全生命周期安全埋下先天隐患。

（二）制造阶段：质量管控链条断裂

制造环节材料以次充好、工艺执行不规范的现象屡见不鲜。甘肃某化工企业在换热器采购中发现，供应商为压缩成本使用了耐腐蚀性能仅达设计要求60%的换热管，若投入使用将直接威胁装置运行安全。此外，焊接、热处理等关键工艺的质量把控不到位，如某压力容器因焊接工艺参数偏离标准，投用后焊缝处出现疲劳裂纹，最终导致介质泄漏。这些问题反映出制造阶段供应链管理松散、过程质量监督缺位的现状^[2]。

（三）安装阶段：施工不规范滋生隐患

安装精度不足会引发设备运行振动超标、密封失效等连锁问题。某合成氨装置的往复式压缩机，因安装时曲轴对中偏差超出标准（径向偏差达0.1mm，远超 $\leq 0.05\text{mm}$ 的要求），运行仅3个月便发生连杆断裂，造成装置非计划停车。

（四）运行与维护阶段：监测与维修机制脱节

多数化工企业仍依赖定期维修模式，缺乏基于设备

状态的预测性维护。某炼油厂常减压装置加热炉，因未及时识别炉管结焦导致的局部过热，最终引发炉管破裂并造成火灾。同时，设备状态监测过度依赖人工巡检，数据的准确性、时效性难以保障，如某化工厂的离心泵轴承磨损，因巡检频次不足未能及时发现，最终导致泵体损毁^[3]。

（五）报废阶段：环保处置与资源回收双重缺失

化工机械报废时，含危废设备（如带有汞污染部件的反应釜）若处置不当，易造成土壤、水体污染；而可回收的金属材料（如不锈钢、合金板材）又因缺乏专业分类回收机制，大量沦为普通废品。某化工园区统计显示，约30%的报废化工设备未得到环保合规处置，同时可回收材料的回收率不足50%，既造成环境风险，又浪费了资源价值。

三、化工机械全生命周期安全管理创新模式构建

（一）设计阶段：本质安全导向的协同设计

材料与结构优化针对化工介质的腐蚀性，采用“材料—介质—寿命”匹配模型选择耐蚀材料。例如，在设计甘肃某煤化工项目的变换气换热器时，结合介质含硫、氨、高温的特点，选用耐腐蚀的TA2，既保证强度又降低成本。引入数字化仿真技术，对设备的强度、刚度、疲劳寿命进行全工况模拟。如对气化炉炉壁进行热应力仿真，识别出应力集中区域，通过调整耐火砖砌筑方式消除隐患。

安全冗余设计对关键设备设置安全冗余，如在高温管道上设置双路温度监测系统，在压力管道上设置超压联锁与爆破片双重保护，确保单一故障不会导致安全事故。

（二）制造阶段：全流程质量管控体系

供应链管理建立合格供应商名录，对材料供应商进行现场审核，从源头把控材料质量。对关键材料（如压力容器用钢板）实施进厂双检验（厂家检验+第三方检验），并留存材料质量追溯档案。

制造过程管控采用数字化制造技术，如换热器的管束焊接采用机器人焊接，焊接合格率从人工焊接的95%提升至99.8%。设置关键工序质量控制点，如气化炉壳体

卷制的椭圆度、直线度等参数实时监测，确保制造精度。

（三）安装阶段：标准化与数字化安装管理

安装流程标准化编制《化工机械安装作业指导书》，对设备吊装、对中、紧固等工序制定明确的操作规范。例如，对离心式压缩机的安装，规定联轴器对中偏差径向 $\leq 0.05\text{mm}$ 、轴向 $\leq 0.02\text{mm}$ 。

数字化安装验收采用三维扫描技术对安装后的设备进行精度检测，生成数字化验收报告，确保安装质量可追溯。甘肃能化金昌公司在某泵组安装中，通过三维扫描发现底座水平度偏差 0.1mm ，及时调整后避免了运行振动问题。

（四）运行阶段：智能监测与预测性维护

智能监测系统构建在关键设备上部署多参数传感器，如在反应釜上安装温度、压力、液位、振动、腐蚀速率传感器，数据实时传输至中控系统。建立设备健康管理（EHM）平台，对数据进行分析，识别异常趋势^[4]。

以金昌公司的甲醇合成塔为例，通过在塔壁安装超声测厚传感器，实时监测腐蚀速率，当腐蚀速率超过 0.2mm/年 时，系统自动发出预警。

预测性维护策略基于设备状态数据和机器学习算法，建立维护预测模型。对压缩机的振动数据进行分析，预测轴承剩余寿命，提前安排更换，避免非计划停机。实施该策略后，金昌公司压缩机的非计划停机次数从每年5次减少至1次。

（五）维护阶段：基于状态的全周期维护计划

维护资源优化配置需结合设备重要度与实际状态，构建A、B、C三级分类维护体系（如表1）。对A类关键设备（如气化炉、大型反应釜），通过振动分析、油液监测等手段实施预知性维护，某煤化工企业的气化炉采用该模式后，年度非计划停机时间从80小时降至15小时，维护效率提升70%；B类设备（如普通离心泵、管壳式换热器）执行定期维护，每季度开展一次全面检测；C类设备（如辅助通风机、小型输送泵）则实施事后维护，仅在故障发生后维修。此分类模式使某化工园区的维护成本降低22%，资源分配精准度提升45%。

表1 化工机械三级分类维护与数字化管理核心参数表

维护类型	适用设备	关键措施/参数	核心成效数据
A类设备预知性维护	气化炉、大型反应釜	振动分析、油液监测	非计划停机80→15小时，效率↑70%
B类设备定期维护	普通离心泵、管壳式换热器	每季度全面检测	维护成本↓22%
C类设备事后维护	辅助通风机、小型输送泵	故障后定向维修	资源分配精准度↑45%
数字化闭环管理	全品类化工机械	MMS系统、移动终端工单闭环	响应24→4小时，库存周转率↑30%，年节约超100万元

维护过程数字化管理需要依托维护管理系统(MMS)实现全流程管控。维护人员通过移动终端接收工单,同步上传现场图片、设备参数等数据,系统自动关联备件库存、人员技能库,实现工单“派单—执行—验收—归档”的闭环管理。某石化企业应用该系统后,工单响应时间从24小时缩短至4小时,备件库存周转率提高30%,年节约备件积压成本超百万元。

(六) 报废阶段: 环保处置与资源循环利用

报废设备规范处置需建立精细化分类名录,严格对照《国家危险废物名录》对报废设备的材质、部件逐一识别。例如含重金属涂层的反应釜、带有汞触点的控制设备等,需委托具备危废处置资质的企业,采用高温焚烧、化学稳定化等工艺处理。甘肃某化工企业通过该流程处置危废设备后,厂区周边土壤重金属含量检测值较处置前下降90%,完全符合GB36600-2018《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准》的要求,从源头杜绝了危废对环境的长期污染。

资源循环利用需构建全品类回收体系。对报废设备中的不锈钢板、合金管材等可回收材料,通过专业检测机构鉴定其性能等级后,分类用于非关键设备制造或材料再生^[6]。以金昌公司为例,其每年回收报废设备钢材500余吨,同时回收的合金管件经性能检测后,用于厂内辅助设备的零部件制造,年减少新材料采购量100余吨,按钢材生产碳排放系数1.8吨/吨计算,年降低碳排放约200吨,既实现了资源的循环利用,又为企业创造了约200万元的直接经济收益,更契合了“双碳”目标下的绿色发展要求。

四、案例应用: 宁夏某煤化工工装置全生命周期安全管理实践

以宁夏某煤化工核心设备——气化炉为例,应用上述创新管理模式,具体实施过程如下:

(一) 设计阶段

采用协同设计模式,联合设计院、材料供应商、制造厂家共同参与。选择抗高温氧化和热震性能优异耐火砖作为炉衬材料,通过CFD(计算流体动力学)模拟优化烧嘴布置,使炉内流场均匀,减少局部高温对炉壁的侵蚀。同时,设置双重压力连锁保护和应急冷却水系统,

提升本质安全水平。

(二) 制造阶段

对气化炉壳体用钢板进行严格的进厂检验,包括化学成分分析、力学性能测试、无损检测。壳体焊接采用埋弧焊+窄间隙焊工艺,焊接过程中实施100%射线检测和超声检测,确保焊接质量。

(三) 运行与维护阶段

在气化炉上安装了热电偶、压力变送器、超声测厚传感器等,数据实时传输至平台。平台通过算法模型对数据进行分析,当检测到炉壁温度异常升高或值超标时,及时发出预警。基于预测性维护策略,对烧嘴、衬里、盘管等易损件提前制定更换计划,使气化炉的连续运行周期大幅增加。

(四) 实施效果

该气化炉投用3年来,未发生安全事故,设备可用率达98.5%,维护成本较同类装置降低25%,验证了创新管理模式的有效性。

结束语

本文构建的化工机械全生命周期安全管理创新模式,通过在设计阶段强化本质安全、制造阶段严控质量、安装阶段规范流程、运行维护阶段智能管控、报废阶段环保回收,实现了设备全周期的安全风险管控。甘肃能化金昌公司的案例应用表明,该模式可以有效提升化工机械的安全性能,降低事故率和运维成本,为化工行业的设备安全管理提供了新的思路和方法。未来,随着数字孪生、人工智能等技术的进一步发展,化工机械全生命周期安全管理将向更智能、更精准的方向持续演进。

参考文献

- [1] 黄凯. 基于全生命周期的石油化工工程质量管理体系改进研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(19): 10-12.
- [2] 廖煥. 化工安全仪表系统全生命周期管理研究[J]. 化学工程与装备, 2025, (09): 75-77.
- [3] 刘鹏飞, 吴红忠. 化工生产中设备全生命周期精细化管理[J]. 中国氯碱, 2024, (03): 14-20.