

# 化工设备安全检修探析

王小军

陕煤集团榆林化学有限责任公司 陕西 榆林 719000

**摘要：**化工设备安全检修是保障人员安全、生产稳定、设备寿命及企业合规运营的关键。本论文聚焦煤化工设备安全检修，剖析了其重要性、现状与创新技术。提出当前行业存在制度执行漏洞、技术手段落后及人才短缺等问题。通过引入HAZOP分析、智能监测等风险评估技术，优化受限空间与动火作业工艺，并融合机器人检修与数字孪生技术，实现检修工作从经验驱动向科学智能转型。研究成果为提升煤化工设备安全检修水平、推动行业可持续发展提供理论与实践参考。

**关键词：**化工设备；安全检修；技术与方法

引言：随着煤化工产业规模持续扩张，设备安全运行成为行业发展的核心保障。由于煤化工设备长期处于高温、高压、强腐蚀且介质易燃易爆的复杂环境，设备故障易引发重大安全事故与经济损失。尽管企业已逐步重视安全检修，但传统检修模式难以满足现代化生产需求，制度落实不到位、技术创新不足等问题亟待解决。在此背景下，探究安全检修技术与管理创新路径，对保障煤化工行业安全生产、提升企业竞争力具有重要的现实意义。

## 1 化工设备安全检修的重要性

化工设备安全检修是化工生产中不可或缺的环节，尤其在煤化工行业，其设备运行环境复杂，介质易燃易爆、有毒有害，安全检修的重要性主要体现在以下几个方面：（1）保障人员生命安全与环境安全。煤化工设备长期处于高温、高压、强腐蚀的恶劣工况，运行过程中设备部件易出现磨损、腐蚀、疲劳裂纹等隐患。若不及时检修，设备可能发生泄漏、爆炸、中毒等事故。通过定期安全检修，可及时排查并消除隐患，阻断事故链，为工作人员创造安全的作业环境，避免环境污染事件发生。（2）确保生产连续性与稳定性。化工生产具有高度连续性，设备故障会导致生产线停滞，造成重大经济损失。如煤制烯烃装置中关键反应设备故障，可能导致整个装置停产，不仅影响产品产出，还会打乱上下游产业链的供应节奏。安全检修通过对设备进行预防性维护、更换易损件、校准仪表等操作，能有效降低设备故障率，减少非计划停机时间，保障生产稳定运行，维持企业的市场供应能力。（3）延长设备使用寿命，降低综合成本。合理的安全检修能够减缓设备性能衰退速度。若忽视检修，设备带病运行，不仅维修成本会因故障扩大而大幅增加，还可能因设备过早报废而需投入巨额资金

进行更换。因此，科学的安全检修从长远来看能显著降低企业设备运维的综合成本。（4）助力技术升级与合规运营。在安全检修过程中，企业可同步对设备进行技术改造和升级，采用更先进的工艺与材料，提升设备运行效率与安全性。随着化工行业安全环保法规日益严格，安全检修也是企业满足合规要求的必要举措，通过检修确保设备符合安全标准与环保规范，避免因违规而面临处罚，维护企业的社会形象与可持续发展能力<sup>[1]</sup>。

## 2 煤化工设备安全检修现状与存在问题

### 2.1 煤化工设备安全检修现状

在煤化工产业蓬勃发展的当下，设备安全检修工作已逐步构建起一套相对规范的体系框架。多数企业依据相关法规标准，制定了定期检修计划，明确诸如气化炉、合成反应器等核心设备的年度、季度及月度检修节点。在检修流程方面，企业愈发重视前期准备工作。检修前，专业团队会对设备运行数据进行详细分析，通过设备运行时的压力、温度、振动等参数波动，预判可能存在的故障隐患，进而制定针对性强的检修方案。检修过程中，针对动火、受限空间等危险作业，严格执行审批制度，配备专业监护人员，运用气体检测仪器实时监测作业环境中的有害气体浓度。随着技术进步，部分先进企业开始引入智能监测技术辅助设备检修。借助物联网、大数据等手段，对设备进行24小时实时状态监测，提前察觉设备潜在故障，实现从传统定期检修向状态检修的逐步转变，提升检修工作的精准性与高效性。

### 2.2 煤化工设备安全检修存在问题

煤化工设备安全检修存在问题的主要有以下方面：（1）制度执行与管理漏洞。当检修进度与安全要求冲突时，部分企业为赶工期，简化安全审批流程，对动火作业、受限空间作业等关键环节的安全措施落实不到位。

一些企业安全检查考核机制受人情关系干扰,对违规行为未能严格惩处,导致制度权威性受损。在设备检修计划制定上,部分企业仍依赖传统经验,未充分结合设备实际运行状况与新技术应用,致使检修周期不合理,存在设备过修或欠修现象。(2)技术手段与人才短缺。部分企业仍依赖传统检修技术,如目视检查、简单量具测量等,对先进检测技术如无损检测新技术、智能诊断技术应用不足。传统技术难以发现设备内部深层次缺陷,无法满足当前复杂设备的检修需求。由于煤化工行业起步较晚,专业检修人才培养体系尚不完善,大机组检修等关键领域人才供不应求。现有检修人员专业技能参差不齐,部分人员对新型设备、新技术掌握不足,面对复杂设备故障难以准确诊断与修复,严重制约检修工作质量与效率。(3)设备来源与备件难题。我国部分煤化工设备依赖进口,国外设备制造商出于技术保护,对设备关键技术与内部结构进行技术封锁,既无详细拆装技术说明,也不提供专用拆装工具,大大增加国内企业设备检修难度。国内生产的部分煤化工备用品在精度、质量稳定性等方面与国外先进设备存在差距,在与进口设备匹配时易出现问题,因一个备件故障影响整个设备运行,且进口备件采购周期长、成本高,设备故障时难以快速更换,严重影响生产连续性<sup>[2]</sup>。

### 3 煤化工设备安全检修技术与方法

#### 3.1 检修前风险评估技术

HAZOP(危险与可操作性分析)与设备状态监测技术的应用,为检修方案的制定提供了系统性、数据化的支撑。(1)HAZOP作为一种结构化、系统化的风险分析方法,基于引导词与参数组合的逻辑框架,通过对设备工艺流程中的温度、压力、流量、液位等参数进行“偏差分析”,识别潜在危险与可操作性问题。其核心逻辑在于将复杂工艺系统分解为多个节点,针对每个节点设定引导词,结合工艺参数正常范围构建偏差情景,进而评估该偏差引发的风险。在煤化工设备检修场景下,HAZOP分析从工艺流程的物质流向、能量传递路径出发,结合设备结构与运行逻辑,系统性地识别检修步骤中可能出现的风险。通过HAZOP分析生成的风险矩阵,可对风险进行分级管理,并针对每个风险点制定包含技术措施、管理措施和应急处置在内的防控方案,推动检修方案设计从传统经验驱动转向科学分析驱动,显著提升检修方案的安全性与可行性。(2)设备状态监测技术依托传感器技术、信号处理技术和数据分析算法,对设备运行状态进行实时或周期性监测,为预知检修提供数据依据。在技术实现层面,振动分析通过加速度传

感器采集设备振动信号,利用傅里叶变换、小波分析等算法将时域信号转换为频域特征,通过分析振动频率、幅值、相位等参数,判断设备转动部件如轴承磨损、齿轮啮合异常、转子不平衡等故障;超声波检测则基于声发射原理,捕捉设备内部泄漏、摩擦、裂纹扩展等异常产生的高频超声波信号,通过信号强度、频率分布等特征参数,实现对密封失效、气液泄漏、结构损伤等问题的早期识别。这些监测技术通过构建设备运行状态的多维数据模型,能够在设备运行过程中捕捉细微的状态变化,提前发现潜在故障隐患<sup>[3]</sup>。结合机器学习算法对历史数据的训练,可建立故障预测模型,将检修工作从被动的“事后维修”转变为主动的“事前预防”。

#### 3.2 关键检修工艺优化

煤化工设备检修中的受限空间作业与动火作业,因涉及易燃易爆、有毒有害介质,风险系数极高。对相关检修工艺进行优化,是保障作业安全的核心环节。(1)受限空间作业防控。惰性气体置换与实时气体监测系统构成风险防控的双重屏障。惰性气体置换遵循气体扩散与浓度平衡原理,通过向受限空间内充入氮气、氩气等惰性气体,利用气体密度差异和扩散作用,将内部的可燃气体、有毒气体或氧气逐步置换排出。在实际操作中,需依据空间容积、气体密度、扩散系数等参数计算置换时间与气体用量,通过多次置换确保空间内可燃气体浓度低于爆炸下限的25%,氧气含量控制在19.5%-23.5%的安全范围。实时气体监测系统则依托物联网架构,通过在受限空间内及周边区域部署电化学传感器、红外传感器、催化燃烧传感器等多种类型气体检测设备,构建三维立体监测网络。这些传感器可实时监测氧气、可燃气体、有毒气体(如H<sub>2</sub>S、CO)的浓度变化,通过边缘计算设备对数据进行预处理,并将异常数据通过无线网络传输至中央控制系统。一旦检测到气体浓度超标,系统立即触发声光报警,并联动通风系统、喷淋系统等应急处置设备,同时向作业人员和管理人员推送预警信息,形成“监测-预警-处置”的闭环管理机制。通过优化受限空间的通风设计,采用强制通风与自然通风相结合的方式,以及规范进出通道管理,设置紧急逃生装置和安全隔离设施,进一步提升作业安全性。(2)动火作业防护。通过技术措施与管理措施的协同应用,构建多层次安全防护体系。在技术层面,无火花工具采用铍青铜、铝青铜等非铁基合金材料制造,其硬度、韧性与耐磨性满足作业需求,同时在撞击、摩擦过程中产生的能量不足以引燃可燃气体。动火区域隔离则综合运用物理隔离与工艺隔离手段,物理隔离通过设置防火毯、

防火隔板、水幕等屏障,将动火区域与周边危险区域分隔;工艺隔离通过关闭阀门、加装盲板、排空管道等措施,切断可燃介质来源。在管理层面,建立动火作业分级审批制度,根据动火区域危险程度划分特级、一级、二级动火,制定差异化的审批流程与安全措施。结合动火前的气体检测、动火过程中的实时监测和动火后的现场清理,形成涵盖作业前准备、作业中管控、作业后验收的全过程管理体系,有效避免火花引发的火灾、爆炸事故。

### 3.3 智能检修技术融合

随着人工智能、物联网、大数据等技术的发展,以下机器人检修与数字孪生技术在煤化工设备检修中的应用,推动行业向智能化、数字化方向转型。(1) 机器人检修技术。基于机械设计、自动控制和传感器技术,研发适用于不同检修场景的专用机器人。管道内部检测机器人采用轮式、履带式或螺旋驱动机构,配备高清摄像头、涡流传感器、超声相控阵探头等检测装置,通过自主导航或远程操控深入复杂管道内部。利用机器视觉算法对管道内壁图像进行缺陷识别,结合无损检测数据对腐蚀、裂纹等缺陷进行定量评估;高压水射流清洗机器人集成高压泵、旋转喷头和智能控制系统,通过精确控制水射流压力、流量和喷射角度,对设备内部积垢、堵塞物进行高效清洗。这些机器人通过搭载的惯性导航系统、激光雷达等定位装置实现自主路径规划,结合边缘计算设备对传感器数据进行实时处理,具备环境感知、自主决策和智能控制能力。在恶劣环境下,机器人可替代人工完成高风险、高精度的检修任务,不仅提升检修效率,还能避免因人工操作失误带来的安全风险。(2) 数字孪生技术。通过构建与物理设备完全对应的虚拟模型,实现对设备全生命周期的数字化映射。在建模过程中,综合运用CAD建模、有限元分析和多物理场仿真

技术,将设备的几何结构、材料属性、运行参数等信息集成到虚拟模型中。在煤化工设备检修场景下,数字孪生技术可对检修步骤、工具使用、人员操作进行虚拟仿真,通过模拟不同检修方案的实施过程,提前发现潜在风险并优化检修流程。通过物联网技术采集设备实时运行数据,将温度、压力、振动等参数同步至虚拟模型,利用数字孪生体与物理实体的双向交互,实现设备状态的实时监控与故障预测。数字孪生技术支持远程协作检修,专家可通过虚拟模型对现场作业进行远程指导,通过叠加增强现实(AR)技术,将检修步骤、安全规范等信息直观呈现给作业人员,提升检修工作的准确性与效率,推动形成“远程诊断-虚拟验证-现场实施”的新型检修模式<sup>[4]</sup>。

结束语:本研究系统梳理了煤化工设备安全检修的关键环节,揭示了行业现存问题并提出针对性创新方案。通过HAZOP分析与智能监测技术实现风险精准预判,依托工艺优化与智能技术融合提升检修安全性与效率。然而,技术推广应用成本、人才培养体系完善等挑战仍需关注。随着数字化、智能化技术的深入发展,煤化工设备安全检修将向更高效、更安全的方向迈进,为行业绿色低碳发展奠定坚实基础。

### 参考文献

- [1]白桦,吴江玮,王恒.浅析现代煤化工设备管理及维护保养技术[J].电脑爱好者(普及版)(电子刊),2022(6):467-468.
- [2]马长生.煤化工机械设备润滑管理及其保养方法[J].现代科技研究,2024,4(10):22-23.
- [3]郑建国,窦义昌,杜旭红,等.化工设备安全检修探析[J].中国设备工程,2025(8):153-155.
- [4]杨海涛.化工设备安全检修探析[J].云南化工,2021,48(6):123-124,128.