

化工企业老旧装置安全风险识别与管控对策分析

陈松宇

泰兴联创绝缘材料有限公司 江苏 泰州 225400

宁夏恒泰生物科技有限公司 宁夏 银川 750411

【摘要】：本文围绕化工企业老旧装置的安全风险识别与管控对策展开深入研究，从装置现状、风险类型、识别方法、隐患排查到管控策略与管理机制等多个方面进行了系统阐述。通过引入现代化技术手段与多维度管理路径，构建起科学、高效的风险防控体系，为提升老旧装置的本质安全水平、保障化工企业的可持续安全运行提供了理论支撑与实践路径。

【关键词】：老旧装置；安全风险；隐患识别；化工企业；管控对策

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.073

1 老旧装置在化工企业中的普遍现状与成因分析

在我国化工行业高速发展的背景下，大量建于上世纪八九十年代甚至更早时期的装置仍在运行，这些老旧装置由于设计标准滞后、材料性能退化、长期超负荷运转等因素，普遍存在设备可靠性下降、自动化水平低和本质安全性差等问题。这类装置往往采用落后的控制系统，缺乏有效的在线监测与预警机制，极易因局部故障演变为系统性事故。装置设计时所依据的技术标准和规范多已过时，难以满足当前日益严格的工艺要求和监管标准。在高温、高压、强腐蚀性介质等复杂工况下，这些老旧装置往往缺乏必要的防护结构与应急控制手段，材料抗应力能力下降，结构疲劳累积严重，极易引发泄漏、爆炸等重大事故，暴露出本质安全水平薄弱的问题，严重制约了企业的稳定运行和安全管理能力。

影响老旧装置安全性的深层原因，还包括运行过程中的疲劳损伤、腐蚀穿孔、材料老化等不可逆性变化。许多企业由于历史遗留问题，对老旧装置的风险评估与维护不到位，存在以修代替的短期应对方式，忽视了设备完整性管理（Integrity Management）的长期规划^[1]。部分装置结构复杂、信息资料缺失，导致设备全寿命周期管理难以实施，致使事故隐患积聚，难以及时发现和处理。尤其在压力容器、换热器、管道系统等关键部位，裂纹扩展和壁厚减薄问题逐年加剧，埋下安全隐患。

化工企业内部管理机制不健全、风险意识不足也是导致老旧装置事故频发的重要因素。一些企业在生产任务压力下，忽略装置运行年限和状态评估，未建立科学的风险分级与隐患排查机制，缺乏专业的工艺安全管理（Process Safety Management, PSM）体系支持。操作人员培训不到位，规章制度执行不严，使得设备在高风险状态下仍持续运行，加剧了事故发生的可能性。随着老旧装置在运行过程中暴露出越来越多的隐患问题，如何精准识别其潜在安全风险，并制定科学、可操作的管控措施，已成为提升化工企业本质安全、降低事故发生率、实现可持续发展的关键环节，也是当前行业安全管理工作中亟需重点突破的核心课题之一。

2 老旧装置安全风险的典型类型与表现特征

老旧装置在长期运行过程中，逐渐暴露出多种典型安全风险类型，其表现在多个维度上均具有高度复杂性与隐蔽性。结构性失效是最为常见的风险之一，包括压力容器金属疲劳裂纹、设备壁厚严重减薄、焊缝区域腐蚀以及法兰连接密封失效等问题，这些缺陷在高温高压工况下极易引发爆炸或泄漏事故。在老旧装置长期运行过程中，地基结构可能因自然沉降或外界扰动而发生位移，造成设备基础不稳、管架变形，进一步引发支撑系统松动或失效。此类变化将导致设备整体受力状态发生改变，尤其在高温高压运行环境下，局部应力集中现象加剧，使得管道接口、弯头、焊缝等部位成为潜在薄弱环节。一旦超过材料承载极限，极易发生裂纹扩展、法兰泄漏甚至设备整体失稳等结构性破坏事故，严重威胁运行安全。

仪表控制系统的失灵是另一类典型风险。在老旧装置中，很多控制系统仍采用传统模拟信号模式，设备灵敏度与响应速度远不能满足现代工艺需求，易出现误报警、信号漂移或控制回路失稳等现象。一旦遇到异常工况，自动联锁系统无法及时响应，导致超温、超压等危险状态得不到有效遏制^[2]。传感器老化、电缆绝缘层破损及控制系统程序缺陷等问题频发，严重削弱了过程安全保障能力。许多事故案例表明，由于自动化系统故障导致的误操作或延迟反应，常常成为灾难性后果的直接诱因。

工艺系统本身的风险隐患也极为突出，特别是在涉及易燃易爆、有毒有害介质的装置中更为严重。典型表现包括安全间距不足、物料走漏点长期未治理、紧急切断系统失效、通风系统不完善等。部分老旧装置仍未实现危险源实时监测和泄漏检测系统的全覆盖，导致风险无法动态掌握。在工艺变动频繁或进行非计划性检修作业时，由于缺乏严格的变更管理机制与作业许可制度，容易出现“跑、冒、滴、漏”等高风险操作状态，增加系统整体的不稳定性。这些风险类型往往在日常运行中不易察觉，但一旦触发，将带来极其严重的人员伤亡与财产损失，亟需系统性识别与科学性控制。

3 安全风险识别方法与技术路径探索

在老旧化工装置的安全管理中,风险识别是预防事故发生的前提和基础。有效的识别方法需结合装置的运行历史、工艺特点和设备状态,建立科学、系统的评估体系。目前较为成熟的风险识别工具包括危险与可操作性分析(HAZOP)、故障树分析(FTA)、事件树分析(ETA)以及层级分析法(AHP)等。这些方法可对潜在危险源、失效模式及其后果进行系统性剖析,从源头上识别出关键风险点。在实际应用过程中,风险识别依赖理论分析,更需结合大量的现场数据与历史信息。通过整合装置运行过程中的各类工艺参数、关键设备的检修记录以及相关事故案例,可以构建起全面的风险数据库。利用数据挖掘与趋势分析技术,对设备运行状态进行动态监控和实时评估,有助于识别潜在隐患的演化路径和风险积累趋势,从而提前制定干预措施,提高风险预警的及时性与准确性,增强老旧装置的整体安全保障能力。

技术路径方面,数字化手段的引入为老旧装置的风险识别提供了更精准的工具支撑。基于大数据的设备健康管理系统(EHM)和状态监测系统(CMS)可实现对关键设备的实时监测,及时捕捉异常振动、温度变化和腐蚀速率等关键参数变化,通过趋势分析提前预警潜在故障^[3]。智能图像识别技术和红外热成像技术也被广泛应用于识别电气系统过载、管道泄漏等隐患。伴随工业互联网与智能制造技术的深入发展,数字孪生技术在化工领域的应用日益广泛。企业通过构建老旧装置的数字模型,将实际运行状态与虚拟仿真系统实时联动,可以模拟设备在不同工况下的响应特征,还能分析风险传播路径与事故演化过程。引入大数据分析 with 人工智能算法,实现对风险的动态识别、预测与干预,帮助管理层快速掌握关键设备运行状态,制定精准的维护决策,有效提升老旧装置的安全管理智能化水平。

在技术路径探索中,还需注重多学科融合与标准化体系建设。将材料科学、设备工程、自动化控制与过程安全管理有机融合,能有效提升识别的深度与广度。应构建统一的老旧装置风险评价标准体系,实现对识别结果的量化评估和分级管理。在风险识别实践中,加强专业团队建设、推动第三方评估机构参与、强化员工风险意识培训,也是提高识别准确性与实效性的关键环节。为了应对老旧装置在复杂工况下日益严峻的安全挑战,必须将多层次、多角度的风险识别方法与现代化技术手段深度融合。在实践中,将HAZOP、FTA、LEC等传统分析方法与大数据监测、智能诊断、数字孪生等先进技术相结合,可实现对隐患的精准识别,还可提升风险评估的实时性与全面性。协同应用这些方法与技术,有助于构建系统化、智能化、可持续运行的风险预警与防控体系,为老旧装置的本质安全提供强有力保障。

4 老旧装置常见隐患的排查机制与评估体系

老旧装置在长时间运行过程中,受腐蚀、疲劳、介质侵蚀等因素影响,极易产生多种典型隐患,包括设备本体的裂纹、穿孔、阀门泄漏、管道支撑松动、电气老化等,这些问题往往具有隐蔽性强、发现难度大的特点。建立系统化的隐患排查机制显得尤为重要。科学的排查机制应以设备全生命周期管理为核心,结合风险分级管控原则,开展定期性、专项性与应急性排查,并实现隐患数据的闭环管理。在涉及高风险介质、高温高压等极端工况运行的老旧装置中,风险因素更为集中且突发性强,任何细微故障都可能引发严重后果。必须强化对关键设备与薄弱环节的在线监测系统布控,利用温度、压力、流量、振动等实时数据掌握运行状态。增加定点巡检的频率与覆盖面,借助热成像、红外检测等技术手段,对重点区域进行精细化排查,确保潜在隐患在萌芽阶段即被发现并及时处置,降低事故发生的可能性。

排查机制的有效实施必须依托专业检测技术与工具,诸如无损检测(NDT)、声发射技术、磁粉检测、超声波厚度测量等手段,可广泛应用于压力容器、换热器、长输管道等关键设备的隐患识别^[4]。应结合热成像技术、电气回路测试仪等辅助手段,对电气火灾、过载隐患进行排查。在排查过程中,应引入动态风险评估理念,构建以风险为导向的设备巡检计划,避免传统“固定周期、固定内容”模式的局限性。建立现场操作人员、检修团队和技术部门协同的隐患排查责任体系,可提升问题发现的全面性与实效性。

隐患评估体系应围绕风险等级、影响范围和发生概率等核心维度,构建标准化、量化的评估模型。常用的评估工具包括风险矩阵法、作业条件危险性评价法(LEC)、生命周期风险评估(LCRA)等,这些方法能够对识别出的隐患进行定性与定量评价,并据此制定合理的整改优先级和治理措施。在体系建设中,应同步推进信息化管理平台建设,将隐患排查结果、评估数据、整改进度等信息进行数字化归档与动态更新,实现隐患从识别、评估、处置到复查的全过程可追溯管理。构建科学、高效的隐患排查机制与评估体系,为老旧装置的本质安全提供坚实保障,真正实现从“被动响应”向“主动预防”的转变。

5 老旧装置安全风险的多维度管控策略分析

老旧装置的安全风险具有复杂性、多样性与动态演变特征,必须依托多维度的管控策略实现有效控制。技术层面的管控是基础,应优先推进工艺技术升级与设备智能化改造,引入现代化控制系统、实施自动化联锁保护和实时监测装置,提升安全保障能力。在高风险环节,如压力容器、储罐区、易燃易爆工艺段,应重点布设传感器网络和在线诊断系统,实时获取关键参数波动,预警潜在失效模式。对于结构性问题突出的设备,可结合剩余寿命评估与腐蚀速率模型,制定个性化的维修

策略与更换计划,避免突发性事故。

管理层面的风险管控需构建覆盖全员、全过程的责任体系,推动工艺安全管理(PSM)制度落地。企业应完善设备完整性管理(MI)和变更管理(MOC)制度,确保老旧装置在进行维修、技改或运行参数变动时的安全性可控^[5]。推动基于风险的检维修计划(RBM)和预防性维护(PM)体系建设,合理配置资源,提高维护效率与风险应对能力。在应急管理方面,应制定有针对性的应急处置预案,并定期开展演练,确保一旦发生突发情况,能够快速、有序、高效地应对,降低事故扩散程度。

文化与制度层面的深层治理同样关键。推动企业安全文化建设,强化员工对老旧装置风险的认知与重视程度,提升一线操作人员的应急响应能力与风险辨识能力,是实现本质安全的根本保障。应建立激励与约束并重的安全管理制度,对隐患排查、违章操作、风险报告等行为实行奖惩制度,强化责任落实。借助信息化平台推动风险数据集中管理与分析,通过动态评估与趋势预判,形成“人防+技防+制度防”的三位一体安全管控体系,实现老旧装置风险管理的科学化、系统化与常态化。

6 优化管理机制提升老旧装置安全运行水平

提升老旧装置的安全运行水平,根本在于构建科学、高效的管理机制,通过制度化、系统化手段对风险进行全过程控制。化工企业应强化装置全生命周期管理理念,从设计、建设、运行、检修到退役阶段,系统规划安全策略和资源配置。在运行管理中,应推动从经验型管理向数据驱动型管理转变,充分利用运行监测数据、设备历史维护记录及事故隐患数据库,建立可追溯、可预警、可评估的运行管理体系,确保老旧装置在安全可控范围内运行。需推动制度标准化,构建涵盖操作规程、维护流程、变更控制与事故调查等模块的完整规章体系,实现

制度与现场的深度融合。

在组织管理层面,应建立专责机制,明确老旧装置安全管理的组织架构和责任分工。企业应设立专门的设备风险评估小组,统筹推进隐患治理与整改工作,建立由设备工程、工艺、安全等多专业构成的跨部门协同机制,提升风险识别和处理的综合能力^[6]。实施绩效考核机制,将装置安全运行指标纳入管理层及一线人员绩效评价体系,有效推动责任落实和管理改进。还应强化外部资源协同,引入第三方专业机构定期开展风险诊断与专项评估,增强风险管理的客观性和专业性,为管理机制优化提供技术支撑。

人员管理是保障老旧装置安全运行不可或缺的要素。企业应制定分层分类的培训机制,围绕老旧设备结构特点、操作要点和典型事故案例,开展有针对性的安全教育与技能提升培训,增强员工的实操能力与应急响应能力。鼓励员工参与隐患排查与风险评估工作,发挥现场人员的主动性和实践经验,提高风险信息的敏感性与反馈效率。在管理方式上,推动信息化手段与现场管理融合,构建基于移动终端的巡检、报修和管理平台,实现问题发现、报告、整改和复查的全流程闭环。优化管理机制,形成责任明确、流程清晰、响应迅速的管理生态体系,为老旧装置的持续安全运行提供坚实支撑。

7 结语

本文围绕化工企业老旧装置的安全风险识别与管控策略展开系统分析,从装置现状、风险类型、识别技术到排查机制与管理优化等多个维度进行深入探讨。构建科学、多层次的风险防控体系,能够有效提升老旧装置的本质安全水平。未来应持续推动技术改造与管理机制协同发展,实现从“风险应对”向“风险预防”的转变,为化工企业的安全生产奠定坚实基础。

参考文献:

- [1] 刘云霄.高危化工装置安全评价中的风险管理研究[J].化工设计通讯,2025,51(12):128-130.
- [2] 吕海潮,鲁峥频,姚东.化工涂料工艺流程优化路径与质量控制要点[J].造纸装备及材料,2025,54(10):89-91.
- [3] 王庆银.石化企业应急能力评估研究进展[J].安全、健康和环境,2025,25(07):1-7.
- [4] 邓卫峰.涂料化工企业老旧装置安全风险防控研究[J].现代盐化工,2025,52(01):79-81.
- [5] 陈俊芳.SL公司催化裂化装置大修项目安全风险研究[D].河北经贸大学,2022.
- [6] 周晓颖.基于三维可视化技术的化工安全风险管理平台构建[D].北京化工大学,2020.