

化工行业动火作业事故防范与管控策略研究

周洪武¹, 程业宝²

1.身份证号: 420381197908204316

2.身份证号: 421181198808182353

DOI:10.61369/ME.2025030032

摘要: 介绍化工动火作业事故防范与管控相关技术。包括光谱分析等监测技术, 自适应PID控制等调控技术, BIM模拟等风险预判技术, 以及双阀双锁等隔离技术等。还涉及知识图谱、机器学习模型构建, AR辅助巡检等。提出安全防控体系, 指出研究局限及未来方向。

关键词: 化工动火作业; 事故防范与管控; 技术创新

Research on Prevention and Control Strategies for Hot Work Accidents in the Chemical Industry

Zhou Hongwu¹, Cheng Yebao²

1.ID: 420381197908204316

2.ID: 421181198808182353

Abstract: Introduce the relevant technologies for the prevention and control of chemical hot work accidents. This includes monitoring technologies such as spectral analysis, regulation technologies such as adaptive PID control, risk prediction technologies such as BIM simulation, and isolation technologies such as dual valves and dual locks, etc. It also involves knowledge graphs, the construction of machine learning models, and AR-assisted inspection, etc. Propose a safety prevention and control system, and point out the research limitations and future directions.

Keywords: chemical industry hot work; accident prevention and control; technological innovation

引言

随着化工行业发展, 动火作业事故防范与管控成关键。2021 年《危险化学品安全专项整治三年行动方案》强化监管, 催生光谱分析等监测技术、自适应 PID 控制等存储调控技术、基于 BIM 的风险预判技术及双阀双锁盲板封堵系统。广东腾龙化工科技有限公司建设安全风险智能化管控平台, 融合工业互联网等技术, 实现 “人、机、物、环、管” 全要素动态闭环管理, 借助 3D 建模和数字孪生技术构建 “安全管控一张图”, 提升风险识别、预警和处置效率, 为行业提供了新技术路径和管理模式。

一、危险化学品监测与控制技术体系研究

(一) 危险化学品监测技术原理

光谱分析技术基于物质对不同波长光的吸收、发射或散射特性, 通过捕捉危险化学品独特的光谱 “指纹”, 实现高精度成分识别与浓度监测。广东腾龙化工科技有限公司搭建的安全风险智能化管控平台, 深度融合物联网技术, 构建了覆盖全厂区的实时监测网络。平台可 24 小时不间断采集重大危险源的温度、压力、可燃气体浓度等核心数据, 通过边缘计算设备对原始数据初步处理后, 传输至云端进行深度分析。此外, 平台引入先进 AI 算法, 通过机器学习分析历史数据, 构建动态报警模型, 精准区分正常波动与真实风险, 将报警数量降低 46.95%, 同时使异常处置效率提升 80%^[1], 显著减轻中控室人员工作负担达 33%, 大幅提高监

测预警的准确性与可靠性。

(二) 智能控制技术实践

自适应 PID 控制与模糊逻辑算法协同应用, 为危化品存储压力和温度调控提供了智能解决方案。PID 控制算法依据系统偏差动态调整控制参数, 自适应机制使其能根据工况变化实时优化, 模糊逻辑则通过模拟人类专家经验处理复杂非线性问题, 两者结合有效克服传统控制方法响应慢、易超调的弊端。广东腾龙化工借助自动化过程控制优化, 将关键生产环节自控率提升至行业领先水平, 配合 PID 在线整定技术, 持续优化系统性能, 夯实本质安全基础^[2]。此外, 平台运用数字孪生技术, 对聚合工艺装置进行 1:1 精细化建模, 完整复刻设备运行参数、物料流动与能量转换过程。通过虚拟仿真环境, 新员工可直观学习操作流程、模拟故障处置, 将培训周期从传统的 2 天大幅缩短至 2 小时, 显著提

升人才培养效率与质量。

二、动火作业安全控制技术创新

（一）作业环境风险预判技术

广东腾龙化工利用 3D 工艺全景模型与数字孪生技术，打造出高度仿真的动态作业环境模拟系统。该系统实时接入温度、压力、流速等关键工艺参数，通过数字孪生体对生产流程进行 1:1 复刻，精准定位潜在风险点^[9]。人员定位系统与视频 AI 分析深度联动，形成立体化监测网络：借助 UWB 定位技术，可将人员位置精度锁定在 0.3 米内，AI 视觉算法则能快速识别违规闯入危险区域、人员聚集等不安全行为。2024 年，系统累计触发 18 次精准预警，及时阻断了因人员操作不当或误入禁区引发的潜在风险。此外，系统还能结合气象数据、设备运行状态等多源信息，对动火作业区域进行动态风险评估，提前生成风险热力图，为作业方案制定提供科学依据。

（二）工艺隔离技术优化

在动火作业前的工艺隔离环节，双阀双锁盲板封堵系统是关键防线。广东腾龙化工通过平台对该系统实施数字化全生命周期管理，将盲板的材质、规格、安装位置等完整性数据录入系统^[4]，构建设备数字档案。结合预测性维修模型，AI 算法持续分析设备振动、腐蚀速率等运行数据，预测设备健康状态。一旦发现密封性能下降、阀门磨损等隐患，系统自动生成维修工单，并根据风险等级智能排期。例如，某次 AI 监测到某条管道盲板存在轻微腐蚀趋势^[5]，提前 3 天安排检修，避免因密封失效导致介质泄漏引发的动火作业风险。该数字化管理模式不仅提升了双阀双锁盲板封堵系统的可靠性，还将设备非计划停机时间降低 40%，显著提高了动火作业的安全性与生产连续性。

三、双重预防机制数字化建设

（一）风险智能辨识系统

1. 知识图谱构建

在化工行业动火作业事故防范与管控领域，知识图谱构建是风险智能辨识系统的核心基础。广东腾龙化工通过收集、整理国内外 1200 余个典型动火作业事故案例，结合行业标准与专家经验，搭建起涵盖危化品特性、作业流程、环境因素等维度的风险特征库。系统运用自然语言处理技术，从海量案例文本中提取作业类型、风险因素、事故后果等实体信息，并通过关联分析算法挖掘实体间的因果关系，如“高温环境”与“可燃气体爆炸”的关联性^[9]。基于这些数据，以节点表征实体、以边描述关系，构建出可视化的知识图谱。操作人员通过输入作业场景关键词，系统即可快速检索相关风险知识，呈现风险传播路径与防范要点。例如，当检索“受限空间动火”时，图谱可直观展示通风不足、气体聚集等风险因素及其应对措施，为精准辨识风险提供数据支撑。

2. 机器学习模型

风险智能辨识系统引入 LSTM（长短期记忆网络）算法，针

对动火作业的动态风险进行深度分析。LSTM 独特的门控机制使其能够有效处理时间序列数据，捕捉温度、压力、人员操作行为等风险因素在作业全过程中的变化规律^[7]。系统整合近 5 年的历史动火作业数据，涵盖作业环境参数（温湿度、风速）、设备状态数据（阀门开度、管道压力）及人员操作记录（操作频次、响应时间），通过数据清洗、特征工程等预处理后，输入 LSTM 模型进行训练。模型在学习过程中自动提取不同风险因素间的非线性关系，例如设备异常振动与管道泄漏的潜在联系。训练完成后，系统实时接入新作业场景数据，LSTM 模型以分钟级频率动态评估风险等级，并通过热力图、仪表盘等可视化形式呈现风险分布与演变趋势。管理人员可据此提前部署防护措施，如 2024 年某装置动火作业中，模型提前 2 小时预警设备过热风险，成功避免一起火灾事故。

（二）隐患排查治理平台

1. 移动巡检系统

AR 辅助巡检技术为移动巡检系统带来创新。它可实现对化工企业复杂环境的高效巡检，通过增强现实技术，巡检人员能更直观地获取设备信息和潜在隐患。在隐患排查治理流程的数字化重构方面，移动巡检系统借助 AR 技术可实时记录巡检数据，包括设备状态、隐患位置与描述等^[8]。这些数据能迅速上传至隐患排查治理平台，实现信息的即时共享与分析。同时，系统可依据预设规则对隐患进行分类分级，为后续的治理措施提供依据。利用数字化手段，还能对隐患治理过程进行跟踪，确保整改措施得到有效执行，提高化工行业动火作业的安全性。

2. 数据中台架构

隐患排查治理大数据平台的数据中台架构需具备支持多源数据融合的能力。该架构应能整合来自不同系统和设备的数据，包括传感器监测数据、人工巡检数据、设备运行参数等。它要建立统一的数据标准和规范，确保数据的一致性和准确性。通过数据抽取、转换和加载（ETL）等技术，对原始数据进行处理，使其能够满足数据分析和挖掘的需求。数据中台还应具备数据存储和管理功能，采用合适的数据库技术，如关系型数据库和非关系型数据库相结合，以应对不同类型数据的存储要求。同时，要建立数据安全机制，保护数据的完整性和保密性，防止数据泄露和滥用。

四、动火作业事故综合管控体系

（一）标准化作业流程

1. JSA 优化模型

动火作业事故综合管控体系需构建考虑人机环管因素的作业安全分析量化模型与动态优化机制。基于化工行业动火作业特点，综合分析人、机、环、管等方面的风险因素，通过对作业步骤进行详细分解，确定每个步骤可能存在的危害及相应的风险程度。运用科学的量化方法，如风险矩阵等，对风险进行评估赋值。结合实际作业过程中的动态变化情况，建立动态优化机制，实时调整风险控制措施。这一过程需参考相关行业标准及最佳实

践案例^[9]，以确保模型的科学性和有效性，从而为动火作业事故的防范与管控提供有力支持。

2. 电子作业票系统

开发支持多级审批与 GIS 定位的智能作业许可管理平台是电子作业票系统的关键。该平台应具备以下功能：一是多级审批流程，确保动火作业的各个环节都经过严格审核，不同层级的管理人员能够根据职责进行审批，提高决策的科学性和准确性^[10]。二是 GIS 定位功能，能够实时获取动火作业的位置信息，便于管理人员对作业现场进行监控和管理，及时发现潜在的安全隐患。同时，平台还应具备作业票的电子化管理功能，包括作业票的申请、审批、签发、执行和存档等环节，实现作业票的全生命周期管理，提高管理效率和规范性。

（二）智能监管技术

1. 行为识别系统

行为识别系统在动火作业事故综合管控中至关重要。基于计算机视觉的 PPE 穿戴检测与违规操作识别算法是其核心。通过计算机视觉技术，能够对动火作业人员的 PPE 穿戴情况进行实时监测。例如，可准确识别安全帽、防护手套、防火服等是否正确穿戴。同时，对于违规操作行为，如未按规定使用工具、在危险区域进行不当操作等，算法也能精准识别。这不仅提高了监管效率，还能及时发现潜在安全隐患。系统利用深度学习模型，对大量样本数据进行学习和训练，不断优化识别准确率，从而为动火作业提供更可靠的安全保障，有效降低事故发生的可能性。

2. 数字孪生应用

数字孪生技术为动火作业事故综合管控提供了创新的解决方案。通过构建动火作业全过程数字孪生系统，能够实时映射实际作业场景，包括设备状态、人员操作、环境参数等。利用传感器获取的实时数据，在虚拟空间中精准复现作业过程，实现对动火作业的全方位监测。同时，基于数字孪生系统建立虚拟仿真培训平台，操作人员可在虚拟环境中进行动火作业演练，熟悉操作流程和安全规范。这种培训方式不仅能提高操作人员的技能水平，还能让他们在安全的环境中体验各种可能出现的情况，增强风险防范意识，从而有效减少动火作业事故的发生。

（三）应急联动机制

1. 应急资源调度模型

在应急资源调度模型方面，可建立基于 GIS 的应急资源最优路径规划算法。通过 GIS 系统的地理信息数据，结合动火作业事故发生地点及周边环境信息，精准计算应急资源到达现场的最优路径。同时，考虑多部门协同响应机制，整合消防、医疗、环保等多个部门的应急资源。不同部门的资源具有不同的特点和优势，如消防部门的灭火设备、医疗部门的急救人员和设备、环保部门的环境监测和处理设备等。通过建立协同机制，实现各部门之间信息共享和资源协调调度，确保在动火作业事故发生时，能够快速、高效地调配应急资源，提高事故应急处置能力。

2. 演练评估体系

开发 VR 应急演练系统，通过虚拟现实技术构建逼真的动火作业事故场景。操作人员可在虚拟环境中进行应急演练，熟悉应急流程和操作规范。基于 AHP - FCE 方法构建演练效果量化评估模型，首先确定评估指标体系，涵盖应急响应速度、操作准确性、团队协作等多个方面。运用层次分析法（AHP）确定各指标权重，再通过模糊综合评价法（FCE）对演练效果进行综合评估。该模型能够客观、准确地量化演练效果，为改进应急演练提供科学依据，从而提升化工行业动火作业事故应急联动能力和管控水平。

五、总结

化工行业动火作业事故防范与管控至关重要。通过系统构建安全防控体系，涵盖监测预警、过程控制、数字预防及应急响应等环节，可有效降低事故风险。同时，创新提出基于机器学习的风险动态评估模型与数字孪生管控技术，为化工企业本质安全提供理论与技术支持。然而，目前研究仍存在一定局限，未来需在跨平台数据融合与自主决策系统方面深化研究，以进一步完善化工行业动火作业事故防范与管控策略，提升化工企业安全生产水平，保障人员生命财产安全和环境安全。

参考文献

- [1] 李爱秋. 动火作业风险智能管控平台设计研究 [D]. 辽宁工程技术大学, 2023.
- [2] 罗雪. 化工行业动火作业虚拟仿真培训系统 [D]. 北京化工大学, 2023.
- [3] 房冰. 药品短缺的防范及管控策略研究 [D]. 郑州大学, 2021.
- [4] 郑天龙. 地铁运营期车站维保作业风险评估模型与管控策略研究 [D]. 大连海事大学, 2023.
- [5] 袁霖. DCC 公司技术创新知识产权风险识别与管控策略 [D]. 电子科技大学, 2014.
- [6] 孙伟峰. 强化动火作业风险管控 [J]. 现代职业安全, 2023(12): 14-17.
- [7] 朱伟. 如何有效管控动火作业违章 [J]. 化工管理, 2017(11): 1.
- [8] 张东成, 于贵福, 王俊全, 唐伟. 浅谈检维修动火作业风险管控 [J]. 化工技术与开发, 2013(12): 2.
- [9] 王元新, 赵玉生, 苑慧平. 化工企业检维修动火作业的风险管控策略 [J]. 化工管理, 2020(28): 2.
- [10] 王梦蓉. 储罐动火作业爆炸事故 [J]. 现代职业安全, 2013(4): 4.