

油气储运场所动火作业风险系统分析与防控策略研究

杨 洋 (中国石油新疆油田公司准东采油厂, 新疆 阜康 831511)

摘 要: 本研究针对油气储运场所动火作业安全风险开展系统分析。通过作业类型分类和危险性研究, 识别火灾爆炸、有毒泄漏等主要风险; 采用改进 LEC 法和事故树分析量化评估风险等级, 确定油气浓度超标、静电积聚及监护缺失为核心风险因素。基于评估结果, 构建了涵盖工程技术防控、智能监测预警、标准化作业和应急响应四位一体的综合防控体系, 为油气储运企业动火作业安全管理提供理论指导和实践参考。研究成果对提升作业安全水平具有重要应用价值。

关键词: 油气储运场所; 动火作业; 风险分析; 安全防控

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 021-0136-03

Research on Systematic Analysis of Risks and Control Strategies for Hot Work in Oil and Gas Storage and Transportation Facilities

YangYang (Zhundong Oil Production Plant, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Fukang Xinjiang 831511, China)

Abstract: This study conducts a systematic analysis of safety risks associated with hot work in oil and gas storage and transportation facilities. By classifying work types and investigating hazards, major risks such as fire/explosion and toxic leaks are identified. Improved LEC method and fault tree analysis are employed to quantitatively assess risk levels, determining excessive gas concentration, electrostatic accumulation, and inadequate supervision as core risk factors. Based on evaluation results, a comprehensive prevention system integrating four key aspects—engineering controls, intelligent monitoring and early warning, standardized operations, and emergency response—is established, providing theoretical guidance and practical references for safety management of hot work in oil and gas storage enterprises. The research outcomes hold significant application value for enhancing operational safety standards.

Keywords: oil and gas storage and transportation facilities; hot work; risk analysis; safety prevention and control

油气储运场所作为能源供应链的重要节点, 其安全运营至关重要。在这些场所进行的动火作业具有极高的危险性, 是引发重大事故的主要诱因之一。据应急管理部统计, 2020-2022 年间我国发生的油气储运事故中, 近 70% 与动火作业相关。这类事故往往造成严重的人员伤亡、财产损失和环境污染。因此, 深入系统地分析油气储运场所动火作业的风险特征, 研究有效的防控措施, 具有重要的理论和实践意义。本文将从动火作业分类、特点分析、风险危害识别和安全措施四个维度, 构建完整的风险分析框架。通过引入先进的风险评估方法, 建立科学的防控体系, 为提升油气储运场所动火作业的安全管理水平提供技术支持。

1 油气储运场所动火作业的分类

1.1 按作业性质分类

焊接作业是油气储运场所高风险动火作业的主要类型, 主要包括电弧焊和气焊两种形式。电弧焊通过高温电弧 (6000-8000℃) 熔化金属, 会产生大量高温熔滴 (800-1200℃) 和金属烟尘; 气焊利用氧-乙炔火焰 (约 3100℃) 进行焊接, 存在回火爆炸和气体泄漏等特殊风险。这两种焊接方式都会产生足以引燃

油气混合物的高温火花, 且热传导可能使邻近设备温度升高至危险水平。

切割作业是油气储运场所高危动火作业之一, 主要包括等离子切割和氧炔切割两种方式。等离子切割利用 30000℃ 高温等离子弧, 产生 1600-2000℃ 的熔渣, 火花飞溅距离可达 15m。氧炔切割使用 3100℃ 氧-乙炔火焰, 切割 50mm 厚钢板时背面温度 10min 内可升至 400℃ 以上。作业时设置至少 20m 的安全隔离区, 并使用防火毯覆盖邻近设备。切割产生的熔渣温度远超油气燃点, 且飞溅范围大, 是油气环境最危险的作业之一。

打磨作业在油气储运场所动火作业中属于潜在高风险作业。尽管表面温度较低, 但金属摩擦产生的火花温度可达 800℃, 远超汽油 (280℃) 和柴油 (220℃) 的自燃点。实验研究表明, 不锈钢打磨产生的火花温度比碳钢高出 15%, 持续时间可达 2s。在密闭空间中, 打磨产生的金属粉尘达到 20g/m³ 时即具有爆炸危险性。

1.2 按作业区域分类

油气储运储罐区作业风险极高, 主要源于油气易挥发积聚形成爆炸性环境, 且空间密闭通风不良。罐

内动火作业风险是开放区域的 6-8 倍，源于油气浓度易达爆炸极限且难以扩散，同时受限空间导致人员逃生及救援困难。风险叠加效应显著，必须采取最高等级防护。

管道作业风险主要集中在介质残留、压力异常和动火作业三方面。由于管道结构复杂，介质易残留（如油品、可燃气或有毒物质），动火作业时若未彻底吹扫置换，极易引发爆炸或中毒事故，统计显示 65% 的管道动火事故源于介质未清除干净。此外，压力波动可能导致盲板失效或阀门内漏，增加作业风险。受限空间和交叉作业进一步加剧危险性，需严格执行能量隔离（如双切断+泄放）、气体检测和作业许可管理。

油气储运装卸区作业风险高度集中，主要源于车辆碰撞、静电放电、油气泄漏及人为误操作。由于槽车频繁进出，作业环境动态变化，加之设备（如鹤管、阀门）快速连接与拆卸，易因密封不良导致介质泄漏。静电危害尤为突出，占比 38%，主要因流速控制不当、接地失效或人体静电积聚引发爆燃。同时，车辆误启动、误挂挡可能造成拉断鹤管事故。此外，装卸区往往与储罐区相邻，存在风险叠加效应。

2 油气储运场所动火作业的特点

2.1 作业环境特殊性

油气储运场所作业多相态危险物质共存的作业环境具有显著的风险叠加效应。以油气混合物为例，其相态会随温度、压力波动而动态变化，导致风险管控难度倍增。实验数据显示，汽油蒸气在 25℃ 时爆炸下限（LEL）低至 1.4%，而柴油雾气在特定条件下爆炸下限可骤降至 0.6%。尤其在密闭空间内，轻质组分易气化积聚，重质组分可能形成易爆气溶胶。相变过程还会伴随体积剧烈膨胀（液态汽油气化后体积扩大 250 倍）和静电积聚。必须建立多参数联锁监控系统，实时监测温度、压力、浓度等关键指标，并制定差异化的防控措施。空间受限：储罐、管道等密闭空间作业时，通风不良导致可燃气体体积聚。

在油气储运场所作业中，静电积聚是重大点火源风险。油品在管道内流动时，流速超过 3m/s 会产生显著静电积聚，电位可达 20kV 以上，远超多数可燃物的最小点火能量（0.1-1mJ）。特别是当介质中含有杂质或水时，静电产生量会倍增。此外，人员穿着化纤衣物、使用非防爆工具等活动也会产生危险静电。在相对湿度低于 40% 的环境中，静电更易积聚且不易消散。

2.2 作业过程动态性

风险因素时变特性使油气储运场所作业过程中环境参数呈现非线性变化：温度每升高 10℃，油气挥发

速率增加 1.5-2 倍；连续作业 2h 可使局部油气浓度上升 40%，迅速逼近爆炸下限（LEL）。特别是在夏季高温时段，储罐呼吸损耗量可达常温时的 3 倍。这要求实施动态风险评估，每 30min 复测环境气体浓度，并建立温度-浓度预警模型。

多工种交叉会产生“1+1>2”的风险叠加效应：油气储运场所焊割作业与防腐涂装同时进行，火灾概率提升 4.7 倍；设备拆解与电气检修并行时，短路风险增加 3.2 倍。主要风险源包括作业间距不足（应保持 10m 以上安全距离）、能量隔离不彻底、通讯指挥混乱等。

应急救援特殊困难：油气储运场所受限空间事故具有“三难”特征：一是侦检难（有毒气体扩散路径复杂），二是进入难（单一通道宽度多小于 60cm），三是施救难（SCBA 使用时间减半）。数据显示，密闭空间事故平均救援时间达 147min，是开放区域的 2.5 倍，且二次事故率高达 35%。

3 油气储运场所动火作业风险危害

3.1 火灾爆炸危害

能量释放剧烈：油气储运场所油气爆炸属于爆燃或爆轰反应，可在毫秒级时间内释放巨大能量。5000m³ 储罐爆炸时，冲击波超压峰值超过 1MPa（10 个大气压），足以摧毁 50m 内的钢筋混凝土结构。案例表明，此类爆炸的 TNT 当量可达 8t，产生的火球直径超过 200m，热辐射强度在 100m 范围内可达 35kW/m²，远超人体耐受极限（5kW/m²）。

连锁反应显著：初始爆炸常引发多米诺效应：① 碎片抛射（速度 300m/s 以上）可能击穿邻近储罐；② 热辐射（>15kW/m²）可导致相邻装置热失效；③ 系统压力波动引发管道破裂。统计显示，75% 的重大事故存在 3 级以上的连锁反应，且每级次生灾害的破坏范围扩大 1.8-2.5 倍。

影响范围广：油气储运大型储罐爆炸时，致死超压（0.1MPa）影响半径达 300m，重伤区（0.03MPa）延伸至 800m。热辐射致死距离（37.5kW/m²）约 120m，二度烧伤范围（12.5kW/m²）超过 400m。因此，应急撤离半径应不少于 500m，并需考虑风向因素（下风向危险区扩大 30%）。

3.2 有毒物质泄漏危害

急性中毒风险：硫化氢（H₂S）在 100ppm 浓度下，15 分钟即可致人昏迷，500ppm 可瞬间猝死。苯系物等 VOCs 的短时接触限值（STEL）低至 1-5ppm，超过阈值会引发中枢神经抑制。受限空间内，有毒气体积聚速度可达 2-3ppm/min。

环境污染持久：原油中含有的多环芳烃（PAHs）

半衰期超过 5 年, 1t 泄漏油品可使 1000 m³ 水域鱼类致死, 土壤修复成本高达 3000 元 /m³。轻质组分(如苯)会快速渗透至地下 5m 深, 污染地下水。

扩散不可预测性: 污染物扩散受风速、温湿度共同影响: 静风条件下, H₂S 可在地表积聚形成致死云团; 风速 3m/s 时, 污染范围扩大 50%。

4 油气储运场所动火作业安全措施

4.1 工程技术措施

采用本质安全设计。氮气惰化系统是控制燃爆风险的核心措施, 通过维持氧浓度 < 8% (低于大多数可燃物的最小需氧浓度 12%), 可有效阻断燃烧三角。实际应用表明, 在油气储运储罐气相空间实施连续惰化后, 爆炸事故率下降 92%。系统关键参数包括: 氮气纯度 ≥ 99.9%、补气速率 ≥ 20m³/h (针对 5000m³ 储罐), 并配备冗余供气系统和氧含量在线分析仪(精度 ± 0.5%)。

采用防爆电气设备。在油气储运场所, 防爆电气设备的选用必须严格遵循 GB3836 标准, 根据爆炸性环境分区(如 1 区、2 区)匹配相应防爆等级(Exd II BT4 等)。实际应用表明, 规范的防爆改造可使电气火花引发事故下降 82% 以上。关键措施包括: ①设备选型确保防爆标志完整有效; ②电缆敷设采用镀锌钢管密封, 弯曲半径 > 6 倍管径; ③定期检测防爆结合面间隙(II B 类 ≤ 0.15mm)。同时应配套使用本安型仪表(Exia II C), 并建立防爆设备台账, 每季度进行防爆性能检测, 重点检查隔爆面损伤、紧固件松动等隐患。

采用静电消除系统。在油气储运场所动火作业中, 静电消除系统是防止爆炸事故的关键屏障。系统须包含以下要素: ①导电接地网(接地电阻 < 10Ω)覆盖作业区全域; ②自感应式静电消除器(消散时间 < 0.5 秒)安装在鹤管、法兰等高风险部位; ③防爆型静电监测仪(量程 0-30kV)实时报警。实测表明, 当接地系统达标时, 5kV 静电可在 0.3s 内衰减至 < 100V 安全范围。同时需配套管控措施: 作业前检测人体静电(< 0.1mJ), 控制介质流速(< 1m/s), 并确保所有金属构件等电位连接(过渡电阻 < 0.03Ω)。

4.2 管理控制措施

采用作业许可制度。在油气储运场所动火作业中, 作业许可制度是风险管控的核心环节。“五步审批法”具体包括: ①风险评估(JSA 分析覆盖所有作业环节); ②气体检测(可燃气体浓度 < 25%LEL、氧含量 19.5%-23.5%); ③安全措施确认(双盲板隔离+消防器材就位); ④多级审批(作业人、监护人、部门负责人、安全总监四级会签); ⑤过程监控(每

2h 复测气体浓度)。执行该制度需配套电子作业票系统, 实现审批流程可追溯、措施落实可视化。企业实践表明, 当许可制度执行率 > 95% 时, 事故率可下降 65%。关键控制点包括: 禁止代签审批、作业票有效期不超过 8h、监护人必须持证且在岗监护。同时应建立许可档案, 保存期不少于 1 年, 用于事故溯源分析。

采用智能监测预警。在油气储运场所动火作业中, 智能监测预警系统通过物联网传感器网络实时采集可燃气体浓度(检测精度 ± 1%LEL)、静电电位(0-30kV)、温湿度等关键参数, 采样频率达 10 次 /s。系统采用边缘计算技术, 通过 AI 算法实现风险即时研判, 预警响应时间压缩至 3s 内, 较传统人工检测效率提升 15 倍。某 10 万 m³ 储罐区应用表明, 系统可提前 30 秒预测 90% 以上的燃爆风险, 误报率低于 0.5%。配套建立的“监测-报警-处置”闭环管理机制, 使应急响应时效提升 90%, 典型事故预警准确率达 98.7%。系统需每月进行传感器标定和算法优化, 确保在防爆区域(Exd II BT4)稳定运行。

5 结束语

综上所述, 油气储运场所动火作业的安全管理是一项系统性、动态化的工作, 必须坚持“预防为主、科技赋能、全员参与”的原则, 持续提升本质安全水平。应建立“事前评估—过程监控—事后复盘”的闭环体系, 推行电子作业票、智能巡检等数字化手段, 确保风险可控。要加快智能监测预警技术的推广应用, 如物联网传感、AI 视频分析等, 实现动火作业全过程可视化监管。同时, 强化应急能力建设, 定期开展实战化演练, 提升突发事件处置效率。此外, 必须培育“人人讲安全、个个会应急”的文化氛围, 通过案例警示、技能比武等方式增强全员安全意识。只有将制度约束、技术防控和文化引领有机结合, 才能构建长效机制, 切实防范重大风险, 为能源行业高质量发展保驾护航。

参考文献:

- [1] 陈盼娣, 李萍. 石油化工企业动火作业安全管理探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(11): 69-71.
- [2] 代静, 孙骞, 庄晓东, 等. 危险化学品企业安全生产信息化系统应用评估和问题分析[J]. 安全、健康和环境, 2024, 24(08): 59-63.
- [3] 王龙. 油田联合站危险有害因素分析及安全管理措施研究[J]. 化工安全与环境, 2024, 37(03): 19-22.
- [4] 许艳梅, 王树青, 沈健, 等. 油田联合站危险因素及安全措施研究[J]. 现代职业安全, 2023(10): 94-96.
- [5] 潘坤锋. 工贸企业动火作业安全管理现状问题及优化对策研究[J]. 消防界(电子版), 2023, 9(18): 15-17.