

定量安全评价方法在油气储运系统中的运用

罗进军¹ 刘亮² 刘泽红³ 姜海瑞¹ 曹新亭¹

(1. 中海油能源发展股份有限公司湛江安全环保分公司, 广东 湛江 524000)

(2. 中海油安全技术服务有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524000)

(3. 中海油(广东)安全健康科技有限责任公司, 广东 湛江 524000)

摘要: 油气储运系统是石油天然气产业链的重要组成部分, 其安全运行至关重要。本文系统分析了油气储运系统的组成特点和风险因素, 重点探讨了定量安全评价方法在储罐区、管道输送、码头装卸等环节的应用, 同时提出了加强设备管理、优化工艺控制、开展后果模拟等安全防范对策, 旨在从全生命周期视角提升油气储运系统本质安全水平, 为行业安全管理提供科学指导。

关键词: 定量安全评价方法; 油气储运系统; 安全风险因素; 运用策略

0 引言

随着油气需求不断增长, 我国油气储运系统规模日益庞大, 但由于油气固有的易燃、易爆、有毒等特性, 储运过程事故风险尤为突出。定量安全评价是识别和控制系统风险的有效方法, 通过系统辨识危险因素, 量化分析事故发生概率和后果, 制定针对性的安全防护措施。文章将开展油气储运系统定量安全评价研究, 该研究对于提升本质安全水平, 防范重特大事故发生具有重要意义, 以期政府监管、企业管理提供科学决策依据。

1 油气储运系统安全风险概述

油气储运系统是石油天然气产业链中的重要环节, 由储存、运输、装卸等设施组成, 包括油气储罐、管道、泵站、码头等^[1]。其特点主要体现在以下方面:

复杂性: 油气储运系统涉及多种设施设备和工艺流程, 组成结构复杂, 不同部分之间存在错综复杂的相互影响和制约关系。系统的任何一个环节出现问题, 都可能影响整个系统的安全运行。

危险性: 油气具有易燃、易爆、有毒等特性, 一旦发生泄漏、火灾、爆炸等事故, 后果十分严重。油气储运设施普遍存在高温高压、化学腐蚀等危险因素, 设备和管道长期处于高应力状态, 一旦失效, 极易引发事故。

不确定性: 油气储运系统受内外因素影响大, 如油气品质变化、设备老化、环境因素、人员操作等, 这些不确定因素给系统安全运行带来挑战。

连续性: 油气储运系统多为连续型生产, 一旦发

生事故, 短时间内难以控制和消除事故影响, 易引发连锁反应和二次事故。

综上所述, 油气储运系统组成复杂、危险性高、不确定因素多、连续性强, 这些特点使其安全风险评估和管理面临严峻挑战, 必须高度重视, 充分揭示各环节的安全风险, 采取有效的安全管控措施。

2 油气储运过程中的主要风险因素

2.1 设备缺陷

油气储运系统中的储罐、管道、泵阀等设备是确保油气安全存储和输送的关键, 但这些设备在设计、制造、安装、使用等环节都可能存在缺陷, 进而引发严重的安全事故。例如, 设备材质选择不当, 可能导致储罐或管道在腐蚀性介质的长期作用下发生泄漏; 设备制造质量不过关, 焊接缺陷、厚度不均等问题可能导致设备在高温高压下发生破裂; 设备安装不规范, 密封不严、接地不良等问题可能导致油气泄漏或静电火花引燃^[2]。此外, 设备在长期使用过程中, 受环境应力、材料老化等因素影响, 可靠性和完整性会逐渐下降, 若检测和维护不到位, 腐蚀减薄、疲劳开裂等缺陷就会不断积累, 最终可能导致设备失效和事故发生。一些重大泄漏、火灾、爆炸事故的调查表明, 设备缺陷往往是导致事故发生的首要因素。因此, 从设备选型、设计到投用、检维修全生命周期管理设备完整性, 对预防和控制油气储运安全风险至关重要。

2.2 操作失误

油气储运作业涉及物料接收、储存、输送、计量、装卸等诸多环节, 每个环节都离不开人工操作。一线

操作人员的安全意识、操作水平、应急处置能力直接关系到储运作业能否安全开展。但在实际操作中，违章指挥、误操作、疏忽大意、违反工艺流程、应急响应不当等人为失误屡见不鲜，极易诱发安全事故。如输油管线定期清管是保证管道输送安全的重要措施，但若清管作业前未对管道进行置换，管内残余的可燃气体遇火星就可能引发爆炸；装卸油品时，若未严格控制装卸速度和压力，容易造成储罐或运输工具溢流、管线振动；若油品装错罐，混入不相容物质，可能引发剧烈化学反应甚至爆炸。调查表明，诸多油气储运事故中都有“人祸”的影子。因此，必须高度重视操作失误风险，从人员招录、上岗培训抓起，强化安全教育和技能训练，建立严格的操作规程和应急预案，加强人员监督和考核，最大限度地减少人为因素导致的事故发生。

2.3 自然灾害

自然灾害如暴雨、洪水、地震、雷击、台风等是油气储运系统面临的主要外部风险之一。油气储运设施多分布在室外环境，易受自然灾害影响和破坏。暴雨洪水可能导致储罐浮顶上漂、管道阀门受损、料场和装卸码头被淹等；地震可能导致储罐底板和管线断裂、设备倾覆等；雷击可能引燃储罐区可燃气体；强风可能掀起储罐浮盘、刮倒电气线路等；低温天气可能导致阀门和设备冻堵、脆裂等^[3]。自然灾害还可能引发次生灾害事故，如洪水淹没装卸区可能导致电气设备短路，从而引发火灾、爆炸；地震损毁管道可能导致大量油气泄漏并遇火源引燃；暴雨冲刷油库料场可能导致油品外溢污染水体和土壤。一些重特大事故的调查表明，自然灾害是引发事故的重要诱因，且极易引发连锁反应和多米诺效应，造成灾难性后果。因此，必须提高对自然灾害风险的认识，开展自然灾害风险评估，针对性地开展隐患排查治理，完善应急预案和物资储备，加强应急演练和协同联动，提升油气储运系统防灾抗灾韧性。

2.4 外部威胁

油气储运系统作为重要的能源基础设施和高危目标，面临恐怖袭击、人为破坏等多种外部安全威胁。一旦油气储运设施遭到蓄意破坏，后果不堪设想。恐怖分子可能利用炸药、燃烧瓶等攻击油库和加油站，引发大规模火灾爆炸；罪犯可能故意破坏输油气管道，导致原油或天然气大量泄漏；不法分子可能盗窃、哄抢油气产品，造成人员伤亡和财产损失。油气储运系统一旦瘫痪，不仅会严重影响社会能源供应，还可能

造成重大生态环境损害和公共安全事件。伊拉克战争期间，联军多次轰炸伊拉克油气设施，导致大量原油泄漏和油田失火，对当地环境和百姓生活造成严重影响；国内外多地发生的输油气管道盗油、盗气事件，暴露了油气储运系统在外部的脆弱性。因此，必须充分认识外部安全威胁的严重性，完善风险防控体系，强化周界防护和入侵报警，加强巡检和监控，增强员工安全防范意识，密切与公安、消防等部门的沟通协作，共同筑牢油气储运安全防线。

2.5 工艺缺陷

油气储运涉及物料输送、储存、计量、装卸、采样等诸多工艺流程，每个环节的工艺参数都必须得到严格控制。但在实际生产中，由于工艺设计缺陷、工艺控制不当或工艺指标偏离，极易引发安全事故。例如，某储油罐在投用初期因液位计选型不当，导致高液位报警失效，最终引发储罐溢流事故；输气管道因清管作业前未对管道进行置换，残余的可燃气体在清管器摩擦火花作用下引发爆炸；油库在卸船作业中由于船泵压力过高，导致输油软管爆裂，原油泄漏引燃；加氢裂化装置因紧急停车操作失误，导致系统超压，引发连锁爆炸。此外，油品采样分析不当可能导致油品质量判定失误，从而造成使用事故；防静电、防雷措施缺失可能导致静电或雷电火花引燃油气；工艺装置动静密封缺陷可能导致重点部位泄漏。这些事故无不暴露了工艺设计和控制中的诸多缺陷。因此，必须把风险管理理念贯穿到工艺设计全过程，开展工艺危险性评价，加强对关键工艺参数的监测和控制，建立完善的工艺操作规程和异常情况处置措施，强化设备设施本质安全，从源头上防范和遏制工艺引发的事故风险。

3 定量安全评价方法在油气储运系统中的具体应用

3.1 储罐区安全评价

储罐区是油气储运系统的核心组成部分，由于储存大量易燃易爆介质，一旦发生火灾、爆炸等事故，后果极其严重。因此，开展储罐区定量安全评价对于揭示事故风险、优化安全防护措施至关重要^[4]。储罐区定量安全评价通常采用事故树分析法，通过识别引发储罐事故的各种因素，如储罐溢流、泄漏、静电火花、雷击、人员吸烟等，构建事故树模型，计算各基本事件发生概率和顶上事件发生概率，揭示事故因果逻辑关系和薄弱环节。在此基础上，可针对性地提出安全对策，包括优化储罐布局和选型、加强储罐完整性管理、完善可燃气体和火灾报警系统、强化防雷防静电

措施、加强作业过程控制等,从而降低事故发生概率。此外,还可通过蒙特卡洛模拟等方法,量化分析事故后果,如储罐火灾辐射强度、爆炸冲击波超压、有毒物质扩散浓度等,为制定火灾爆炸紧急疏散预案和确定安全防护距离提供依据。

3.2 管道输送安全评价

输气管道穿越复杂环境,受外部因素影响大,且一旦发生泄漏事故,影响范围广、处置难度大,因此必须重视管道输送安全风险评价。管道定量安全评价常采用故障树分析法,通过分析影响管道完整性的各类因素,如管道腐蚀、第三方破坏、施工缺陷、地质灾害等,建立故障树模型,计算管道泄漏失效概率,找出管道薄弱段。在此基础上,有针对性地制定管道电流阴极防护、加装护板、加强巡线等防控措施。此外,管道安全评价还需开展泄漏后果模拟,分析管道泄漏对周边环境、居民的危害范围和程度,为制定泄漏应急处置预案提供支撑。同时,还要开展管道泄漏检测、紧急关断系统可靠性评估,优化探测器布置和阀室间距,最大限度减少泄漏量,降低事故危害。近年来,借助数字孪生、大数据等新技术,可实现管道全生命周期完整性管理,及时发现和处置管道缺陷隐患,不断提升本质安全水平。

3.3 码头装卸安全评价

油气码头是油品装卸和水陆转运的枢纽,作业工况多变,人机密集,作业安全风险突出。码头定量安全评价重点关注装卸作业过程危险有害因素分析和控制。通过对装卸设施、装卸工艺、货物性质等开展系统危害识别,运用作业条件危险性评价法确定各危险因素的风险等级,找出关键控制点。在此基础上,可从完善码头工艺设计、改进装卸设备、优化作业程序、加强人员能力等方面制定安全改进措施。同时,码头安全评价还应开展装卸事故后果模拟,如码头火灾、油品入水等情景下的危害后果评估,制定严密的应急处置预案。而借助虚拟仿真、增强现实等新技术手段,可实现码头作业全流程数字化模拟评估和可视化管控,及时发现和消除作业安全隐患^[5]。此外,海上溢油事故常引发重大海洋生态损害,因此码头安全评价还应重点评估溢油风险,制定海上溢油应急处置预案,最大限度降低事故危害。码头作业涉及船舶靠离泊、装卸臂(管)连接、油气输送等多个环节,每个环节都存在诸多不安全因素。因此,有必要运用故障树分析、事件树分析等方法,系统识别码头作业事故成因,计算事故概率,并模拟事故后果,为制定有针对性的

安全防范措施提供依据。

3.4 定量安全评价结果在安全管理中的应用

定量安全评价是油气储运系统安全管理的重要工具。通过开展定量评价,可全面、系统地识别油气储运过程中存在的危险有害因素,揭示事故致因机理,找出事故隐患,为制定有针对性的安全防范措施提供科学依据。定量评价可为储罐、管道、码头等重大危险源的安全布局、等级划分提供支撑,并指导制定相应的安全防护距离和应急措施。定量评价结果可直接应用于安全检查和隐患排查治理,有助于科学配置检维修资源,强化对薄弱环节的集中管控。定量评价还是开展安全整改和技术改造的重要抓手,通过量化分析投入产出比,可优化安全投资,最大化安全效益。定量评价为岗位安全操作规程、事故应急预案编制提供重要技术支撑,使各项安全管理制度更加科学严密。定量评价结果还可用于安全教育培训,使员工直观理解作业风险,增强安全意识。总之,将定量安全评价结果充分应用于安全管理各环节,可切实提高油气储运系统本质安全水平。

4 结束语

总之,油气储运系统定量安全评价是一项系统工程,需要从全生命周期视角,综合运用多种定量评价方法和新技术手段,动态识别和控制系统安全风险。未来,还需要进一步加强数字化、智能化技术在定量评价中的应用,实现油气储运系统全过程、全要素的可视化管控和优化调度,不断提升本质安全水平。同时,要加强基础理论研究,完善定量评价指标体系和数据支撑,强化人员能力建设,深化国内外交流合作,推动行业定量安全评价创新发展。

参考文献:

- [1] 王欣. 定量安全评价方法在油气储运系统中的运用[J]. 中国化工贸易, 2022(23):184-186.
- [2] 俞志东, 周锡堂, 于湘. 基于层次分析法的油气储运安全评价[J]. 广东化工, 2012, 39(14):28-29, 6.
- [3] 胡灯明. 油气管道安全预评价方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2010.
- [4] 帅健, 单克. 基于失效数据的油气管道定量风险评估方法[J]. 天然气工业, 2018, 38(9):129-138.
- [5] 张赛. 安全评价方法在城市油气管道安全管理中的应用研究[D]. 辽宁: 辽宁工程技术大学, 2015.

作者简介:

罗进军(1989-), 男, 广西河池人, 工程师, 大学本科, 主要研究方向为安全与职业健康。