

Cause Analysis and Emergency Disposal Plan Research on Chemical Production Leakage Accident

Feng Yang¹ Yuna Li¹ Fei Hu¹ Shange Chi²

1 Zhejiang Lanmei Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

2 Zhejiang Aoshou Material Technology Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324000, China

Abstract

Chemical production leakage incidents present complex causes, stochastic evolution patterns, and challenging management challenges, constituting a core issue in industrial safety management. This study systematically analyzes two primary causative factors—equipment failures and human operational errors—while elucidating the dynamic characteristics of leakage dispersion and chain-trigger mechanisms. Building upon these insights, we establish an emergency response framework encompassing source control, environmental dilution, and neutralization measures, alongside a decision support system integrating risk assessment, resource allocation, and multi-department collaboration. Finally, we explore pathways for enhancing emergency response capabilities through three dimensions: digital monitoring and early warning systems, field-tested drill evaluations, and lifecycle management protocols. The research aims to provide theoretical foundations and practical references for chemical enterprises to strengthen leakage prevention systems and improve emergency response efficiency.

Keywords

Chemical leakage; Accident cause; Dynamic evolution; Emergency response; Decision support

化工生产泄漏事故成因分析与应急处置方案研究

杨丰¹ 李玉娜¹ 胡飞¹ 池善格²

1. 浙江岚美科技有限公司, 中国·浙江 杭州 310000

2. 浙江奥首材料科技有限公司, 中国·浙江 衢州 324000

摘要

化工生产泄漏事故成因复杂, 演化随机, 处置困难, 是行业安全管理的核心难题。本文系统分析了设备设施失效与人为操作失误两类主要致因, 揭示了泄漏扩散的动力学特征与事故链式触发机制。在此基础上, 构建了涵盖源头控制、环境稀释与中和的应急处置技术体系, 并提出了基于风险评估、资源调度与多部门协同的应急决策支持系统。最后, 从数字化监测预警、实战化演练评估与全周期管理制度三个维度, 探讨了应急能力的提升路径。研究旨在为化工企业健全泄漏防控体系、提升应急响应效能提供理论支撑与实践参考。

关键词

化工泄漏; 事故成因; 动态演化; 应急处置; 决策支持

1 引言

化工生产包含许多易燃, 有毒, 腐蚀性的物质, 如出现泄漏, 非常容易引发火灾, 爆炸, 中毒等一系列连锁反应, 这会给人员生命, 自然环境和公共安全造成极大危害。泄漏事故的防范重点在于深入领会致因原理, 明确掌握发展规律, 科学安排应急资源。如今, 化工装置变得越来越大, 越来越复杂, 以往那种消极应对的方式已无法适应风险控制的需求。因此, 系统剖析泄漏事故的根源与演化路径, 构建全链条、多层次的应急处置与决策支撑体系, 并探索以数字

化、实战化为导向的能力提升机制, 对于提升化工行业本质安全水平、遏制重特大事故发生具有重要的理论价值与现实意义。

2 化工生产泄漏事故成因分析

2.1 设备设施失效机理

设备设施失效属于化工泄漏的主要物理成因, 其机理包含诸多复杂过程, 比如材料老化, 腐蚀减薄, 密封失效以及疲劳断裂等。在长期处于高温, 高压并且存在腐蚀性介质的情况下, 金属材料的微观组织结构会变差, 造成强度减弱和脆性增大, 这样就容易在应力集中的地方产生裂纹, 并逐渐扩展出去。设备相接的地方, 诸如法兰, 阀门, 垫片之类的部分, 由于安装不正确, 选型有误或者受到长期的交

【作者简介】杨丰(1986—), 男, 中国江西上饶人, 本科, 工程师, 从事化工安全研究。

变载荷影响,其密封性能就会渐渐下降,从而引发微小泄漏甚至喷射式的泄漏现象发生。像安全阀,爆破片这样的安全附件,如果校验迟缓或者选型不对头,那么在出现超压状况的时候,它们就不能有效地实施泄放操作,反倒成了比较脆弱的环节^[1]。失效不是单个因素造成的,往往是设计存在漏洞,制造有瑕疵,安装出现偏差,运维有所短缺这些情况相互作用而形成的累计成果,其表现出明显的渐次性和隐匿性特点。

2.2 人为操作失误类型

人为操作失误存在于化工生产的各个环节,是引发泄漏事故的重要因素。从失误的表现形式来看,可以分为认知失误,决策失误和执行失误这三类。认知失误指操作人员对于工艺参数的异常变化,设备报警信号或者现场危险迹象的识别存在迟缓或者判断出现偏差的情况,从而丧失了理想的干预机会。决策失误多发于非正常工况之时,操作人员依照经验采取了不当的处理办法,比如误关阀门,误停关键设备,这样就加重了物料泄漏的风险。执行失误则是指没有按照操作规程去执行,比如没有按要求实施吹扫置换,没确认阀门状态便加入物料之类的情形。

3 泄漏事故动态演化规律

3.1 泄漏扩散动力学特征

泄漏介质从设备瑕疵处喷出时,其扩散行为由物质物性,泄漏源参数以及周边环境条件相互作用所控制。气相泄漏往往形成高速射流,在动量起决定作用区域表现为锥形膨胀,之后转变为以浮力为主要因素的烟羽扩散,浓度分布朝着下风向呈高斯型递减,受到大气稳定度,风速以及地面粗糙度的影响十分明显。液相泄漏会先在围堰或者地面上形成液池,经过热交换产生闪蒸或者蒸发,气化物融入大气扩散,没有蒸发的部分顺着地势蔓延开来,有可能进入排水系统引发次生污染^[2]。两相流泄漏时,相间传质与动量交换令扩散行为变得更为复杂,液滴蒸发时会吸收热量形成低温重气云团,这种云团具备长距离沉降及向低洼处聚集的特征。

3.2 事故链式触发机制

化工泄漏事故很少单独出现,它的危害常常通过链式激发机制被成倍扩大。当最初出现泄漏现象时,如果未能立即加以控制,可燃或者易燃介质就会聚集在有限的空间当中,等到达到爆炸限度并遇上火源之后就会产生爆炸,产生的冲击波有可能破坏临近的设备,使得泄漏范围变得更为庞大。有毒物的泄漏除了能够致使人员中毒之外,假如它的扩散途径经过高温设备,那么就有可能产生热分解作用进而生成毒性更高的次生污染物。此外,泄漏介质对设备根基实施腐蚀,对电气设施造成侵害,这些情况都会间接促使设备倒塌,电力供应停止,进而引发联合停车以及次生的无法控制的化学反应。这样的链式激发实质上就是能量和物质的不受约束的传递过程,其发展速率同介质本身的危险属性,设备

排列的紧密程度以及最初应急反应的效果相关联,表现出时空关联,因果交错的繁杂网络特点。

4 应急处置技术体系

4.1 源头控制与切断技术

源头控制属于应急处置的关键准则,重点在于尽快制止物料不断向外流出。针对阀门,法兰之类的结合处出现泄漏情况,可以运用带压堵漏技术,凭借专门的夹具,注胶工具在不停机的情况下形成临时的密封体系。操作的时候要准确掌握注胶的压力以及固化的时限,规避由于操作失误造成密封效果变差。要是管道存在孔洞或者裂缝,可以用机械卡箍,捆绑带等物理手段来执行临时性的封堵措施。如果储罐或者反应器自身发生破裂这样的严重泄漏状况,应当首先开启紧急切断装置,从远处关闭根部阀门,把故障部分隔离开来,再通过紧急泄压,物料倒入备用容器等办法减小泄漏的规模。

4.2 环境稀释与中和工艺

泄漏若已蔓延到环境,则要利用稀释与中和工艺来减小其危害浓度。针对可燃气体泄漏情况,消防水幕或者水炮能够生成水雾隔离层,通过水蒸气实施稀释并吸收辐射热,而且水雾对气体云团具备机械驱散和动量稀释功能,可以改变其扩散方向与积聚范围。就氨,氯等具有水溶性的有毒气体而言,可以设置水幕墙来执行洗涤吸收,凭借喷雾水滴较大的比表面积特点,提升气液传质效率,把气相污染物转移到液相之后再集中加以收集处理^[3]。酸性或者碱性液体发生泄漏时,要用碱性或者酸性物质作为中和剂来做化学中和处理,要随时监测pH值来控制投入量,保证反应足够彻底,还要防止因为中和过程释放大量热量或者产生有害副产品而造成污染。

5 应急决策支持系统

5.1 风险评估与分级方法

应急决策要依靠快速评定泄漏事故风险并科学分级,评定时要把泄漏介质的理化特性,泄漏速率,扩散情况以及受影响人群当作核心变量,综合利用事故后果模拟和风险矩阵法。及时获取气象数据,地理信息和人口分布数据之后,就能马上推算出不同时间点可燃或者有毒云团的覆盖范围,暴露浓度和持续时长,按照这些来划分危险区,缓冲区和安全区。风险分级还要综合考虑人员的易损性,环境的敏感程度和应急处理的可行性,把事故等级分成一般,较大,重大,特别重大四个级别,并分别启动相应层级的应急响应。分级结果直接影响警戒范围的划定,人员疏散的距离以及应急资源调配的先后顺序,还是后续资源调度和指挥协同的逻辑出发点。

5.2 应急资源优化调度

在应急资源存在局限的情况下,达成高效的调度很关键,这是控制事故损失的重点所在。要想优化调度,就要按

照事故的严重程度以及风险评定的结果来动态调配消防车,防护装备,堵漏工具,中和剂之类的资源种类及其数量。调度模型要充分考虑到资源存储点和事故点之间道路网络的通行能力,还要遵照运输时间窗口所施加的限制,并且也要顾及到多个事故点之间存在的资源竞争状况,防止因为资源聚集或者延误而导致失去有利时机^[4]。针对那些规模大且情况复杂的事故,应当启动区域性的应急资源联合管理机制,打破企业和园区同政府消防队之间固有的资源隔阂,做到跨地区,多层次的资源统一调配。

5.3 多部门协同指挥机制

化工泄漏事故的处理常常牵涉到很多部门,比如应急守护,消防救援,生态环境,医疗卫生,公安交通管理等,这些部门有没有协同指挥机制会直接影响到应急措施的效果。所以要创建起一个统一指挥,分级负责,信息共享,共同响应的指挥体系,还要清楚界定事故现场总指挥的权力范围以及各个部门在应对过程中的职责界限,这样才能够让各有关部门做到情况分析,命令传达和执行反馈的同步协调,免除由于信息隔绝而产生的执行矛盾或者资源闲置现象。而且还要保证信息通报制度既能准确传递内部指令,又能对外发出一致的声音,免得错误消息引起公众惊慌失措。演练和实战过程中,要持续磨合跨部门衔接流程,消防救援和医疗救护之间的现场交接,环境检测与疏散决策所需的数据支持等,从而塑造起无缝对接的应急联动局面。

6 应急能力提升路径

6.1 数字化监测预警平台

创建数字化检测报警平台,这是做到由被动回应转为主动防范的关键依靠。该平台要融合工艺流程参数,设备在线监测得来的数据,视频智能分析结果以及气体传感网络信息,形成起企业层面和园区层面协同的全面感知系统。通过数字孪生技术创建装置的三维模型,随时显示主要设备的健康状况以及工艺参数的波动走向,针对腐蚀速度,振动反常,温度超标等前期迹象实施智能警报。此平台装有泄漏扩散快速模拟引擎,一旦报警被激活,就能在几分钟之内完成泄漏量的估计并推断扩散情况,以此给予应急应对以预先判断。而且,还要打通企业,园区和政府监督平台之间的数据通道,达成风险信息由下而上汇集,指令由上到下传达的效果,把警报信息准确发送到有关的责任部门,保证可以立即执行预先控制措施。

6.2 实战化演练评估体系

应急演练是否有效,取决于它接近真实事故的复杂程度,也取决于评价方法是否科学。实战化的演练要克服脚本化,表演化的偏向,可以采用双盲设置,无预案调动,临机

设险这些方式,来模仿真实场景下信息不确定,资源有限,决策时有压力的情况。演练科目要包含事故察觉,初步处理,扩大应急,跨部门协作,舆情回应等全部流程环节,主要考察应急响应程序是否实用,现场指挥能否及时作出决定^[5]。评价体系应该创建全面的量化指标,覆盖响应速度,资源到达比例,战术手段的正确性,人员防护是否符合规范,协同指令是否契合等方面。经过演练回顾和情景再现,深入分析各个环节存在的不足,列出问题清单并制定改进办法,达成以练推动创建,以评促使改正的循环改善目标。

6.3 全周期管理制度设计

要想加强应急能力,关键在于依靠系统化的管理制度来固定成果。全面的管理制度设计需融入预防,准备,响应,重建这四个阶段,形成起责任明确,流程标准,可随时调整的管理体系。在预防阶段,创建设备完整性守护程序,严格推广泄漏检测与修复技术,把泄漏风险列入到日常巡查和专业检测必要检查的范围当中。在准备阶段,明确应急预案的编写准则,评审步骤以及备案规定,保证预案在组织架构,应急资源,响应流程等方面具有可行性。在响应阶段,规范信息报送的时间限制和内容要点,塑造应急处理回顾和后续评价机制,把事故经验教训变成成制度修订的依照。恢复阶段要明确事故装置复产时安全条件确认的程序,防止因急于复产而发生次生事故。通过制度形成来不断优化应急能力。

7 结语

化工生产泄漏事故的防控属于系统工程,其包含预防,准备,响应,重建各个环节。本文从事故成因及发展规律入手,塑造起牵涉源头把控,环境处理的技术体系,凭借风险考量,资源调配以及协同指挥创建起决策支持框架,着眼于能力优化,重视数字化观测,实战化演习和全流程管理的关键意义。未来,应进一步推动工业互联网、人工智能与风险管控的深度融合,促使安全管理从经验驱动向数据驱动的范式转变,实现事前精准预防与事中智能响应的有机统一。

参考文献

- [1] 马腾,徐新华,王东旭.化工机械事故的控制与分析[J].山东化工,2025,54(17):177-180.
- [2] 陈婷.特种设备管理对化工安全事故预防效果分析[J].石化技术,2025,32(09):115-117.
- [3] 陈晓琳,李喆.化工行业压力容器储罐的风险因素及预防措施[J].设备管理与维修,2025,(10):97-99.
- [4] 魏娜.化工生产过程中危险化学品泄漏事故应急处理技术研究[J].石化技术,2025,32(04):371-372.
- [5] 牛鹏钧.注缓蚀剂罐泄漏原因分析及预防措施[J].化工装备技术,2024,45(05):46-49.