

化工企业挥发性有毒气体泄漏监测与应急处置技术研究

孔令洁 梁洋铭

辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院 125105

DOI: 10.32629/ems.v8i8.21598

[摘要] 化工生产各工序普遍存在各类挥发性有毒介质,物料本身的扩散特性与毒害属性会对厂区作业环境及人员安全构成威胁。生产设备与管线密封结构出现工况变动时,有毒介质会向外扩散,引发厂区安全风险。现代化工生产装置集成程度与运行负荷逐步提升,设备密集布局会加快泄漏介质的传播速度,行业对安全防控技术的精细程度提出更高标准。科学的监测手段与系统的应急处置体系,能够完善化工生产安全风控架构,为企业稳定开展生产作业提供技术保障。

[关键词] 化工企业;挥发性有毒气体;泄漏监测;应急处置;安全技术

引言

化工生产工艺包含反应合成、物料输送、密闭储存等核心环节,工序运作过程涉及的苯系物、硫化物、含氮化合物等介质,兼具毒性、挥发性和易燃易爆的多重理化属性。设备运行过程产生的工况波动会改变密闭生产系统的运行状态,外泄的有毒气体能够在厂区空间内扩散,影响生产装置稳定运行与现场作业环境。传感检测、智能研判、自动化处置等新技术的迭代更新,能够丰富化工气体风险防控的技术手段,构建覆盖全流程的安全管控体系,提升化工生产安全管理的规范程度。

1 化工企业挥发性有毒气体泄漏的工况特征与传播规律

1.1 泄漏工况的现场形成特征

化工生产系统的密封结构状态决定挥发性有毒气体的外逸形式,法兰连接点位、管道对接端口、控制阀门、储罐呼吸构件等设备衔接部位,是气体外逸的主要发生区域。长期稳定运行的生产装置会持续接触腐蚀性工艺介质,设备内壁与密封构件会产生理化损耗,构件贴合精度逐步改变,细微间隙会形成微量气体渗透现象。

处于启停切换周期的生产设备,工艺压力与温度参数的动态变化会引发金属构件热胀冷缩形变,密封结构贴合状态产生细微偏移,设备运行切换阶段会出现阶段性气体外溢现象。物料装卸、设备检修、工艺调整等人工介入作业,会改变密闭生产系统的封闭状态,临时开启的设备端口与拆装点位会形成开放性气体溢出通道,对应气体溢出规模与空间扩散范围具备随机性。行业依据气体溢出形态将泄漏工况划分为微量渗透、缝隙扩散、端口开放三类,不同工况在气体溢

出速率、空间浓度累积模式、区域分布形态方面均存在差异化特征。

1.2 有毒气体的空间传播规律

挥发性有毒气体脱离密闭生产系统后,空间扩散过程会受到介质自身理化属性与厂区外部环境的双重影响,气体分子量、密度等基础参数奠定空间分布的核心形态。介质密度大于空气的有毒气体向外扩散后会呈现下沉运动趋势,逐步积聚于设备底层、管沟通道、厂区低洼区域,形成下部空间浓度偏高、上部空间浓度偏低的分层分布状态。

介质密度小于空气的有毒气体扩散过程以向上运动为主,容易在厂房顶部、高空设备夹层等上部空间形成聚集区域。厂区风速、空气温湿度、大气气压等气象条件会干预气体扩散进程,通风流通性良好的开阔区域可加快气体消散速率,密闭厂房与密集设备集群会弱化空气流通效果,促成局部空间气体浓度的累积现象。相关传播规律的系统梳理,能够为厂区监测点位布设、预警参数设定、应急方案编制提供科学依据,让安全防控体系适配现场运行工况^[1]。

2 化工企业挥发性有毒气体主流泄漏监测技术及应用

2.1 定点传感监测技术的现场布设与应用逻辑

固定式气体传感设备通过内部电化学、光学及催化燃烧感应元件完成空气介质中有毒气体组分的动态采集,感应元件可将气体浓度变化转化为标准化电信号,整套设备可实现厂区目标气体浓度参数的连续性采集与传输。企业依据生产介质的理化属性匹配对应类型的传感探头,针对硫化氢、氨气、苯蒸气、甲醛等不同有毒气体设置专属检测模块,让设备感应精度适配各类有毒介质的识别需求。

技术落地过程遵循厂区风险分级管控原则完成点位布设工作，工作人员结合生产装置的危险等级划分监测区域，储罐存储区、反应装置运行区、工艺管道密集区与现场操作平台均布置高密度监测点位，厂区通行通道、办公辅助区域布设基础监测点位，完整的点位布局可实现生产厂区监测范围的全面覆盖。所有传感设备可接入厂区分布式控制系统与安全预警平台，设备采集的实时浓度数据可上传至系统后台完成数据比对分析，系统内置的参数阈值可对现场气体浓度变化进行智能判别，浓度数值达到预设标准时即可启动预警程序，帮助现场管理人员及时捕捉泄漏初期的工况变化，为早期安全管控提供数据支撑^[2]。

2.2 红外光学监测技术的精细化检测应用

不同类型挥发性有毒气体的分子结构具备专属红外光谱吸收特征，红外光学监测设备依托该物理原理完成气体组分识别与浓度测算，光谱信号的细微波动可对应气体介质的种类与含量变化，设备运行过程中可同步完成泄漏位置的精准定位工作。光学成像设备可将无形的气体扩散过程转化为可视化图像画面，工作人员通过成像画面观察气体羽流的扩散形态、传播方向与空间聚集范围，监测模式摆脱传统单点采样的数据采集形式，实现区域整体气体分布状态的全景掌握。

设备运行原理不依赖气体接触感应，可在设备堆叠、管线交错、空间结构复杂的生产区域开展检测工作，高空塔器设备、密闭设备夹层、长距离输送管线等常规检测难以覆盖的区域，均可通过红外光学设备完成细致排查。企业日常巡检体系可融入便携式红外光学设备的应用流程，巡检人员借助便携设备完成厂区全域范围的周期性筛查，固定监测点位搭配在线红外监测装置完成重点区域二十四小时不间断监测，两种应用形式相互配合，构建可视化、高精度的立体化监测体系^[3]。

2.3 无人机搭载监测技术的全域巡检应用

多旋翼无人机作业平台可搭载高清光学成像设备、高精度气体传感模块与5G无线传输组件，设备组合可适配大型化工园区大范围、立体化的气体监测工作。工作人员提前在控制系统内部录入厂区巡检航线与作业参数，无人机可按照预设航线完成自主飞行与定点采样，飞行过程中同步完成多点位气体浓度采集、现场影像记录与环境参数采集，所有监测数据可通过无线传输通道实时回传至地面控制终端。

设备空中作业的运行模式可以跨越地面空间障碍，针对储罐顶部、高空架设管线、塔器高层结构等人工巡检难以抵达的位置开展细致检测，有效填充地面监测体系的空间覆盖范围。终端控制系统可对回传的多维度数据进行整合解析，结合空间坐标信息梳理气体分布特征与泄漏源头位置，为现场工况研判与安全管控部署提供精准的数据支撑。无人机监测模式可适配厂区日常隐患排查、极端天气过后的工况复核、突发泄漏工况的全域复测等多种作业场景，提升大型厂区气体监测工作的覆盖广度与作业效率^[4]。

2.4 LDAR 泄漏检测与修复技术的常态化管控应用

LDAR 技术体系聚焦化工设备各类密封连接点位的无组织气体排放管控，整套工作流程围绕设备微小缝隙、密封构件接口产生的微量气体溢出问题建立系统化管控模式，适配化工生产设备海量密封点位的精细化管理需求。技术落地初期，工作人员对厂区所有工艺法兰、控制阀门、密封接头、设备接驳端口等密封构件开展全面摸排登记，结合设备位置、工艺属性、运行参数建立电子化设备台账，实现所有密封点位的信息化建档管理。

工作人员依据行业规范与企业管控标准制定周期性检测计划，使用便携式高精度检测仪器对所有建档点位逐点完成浓度检测，记录各点位的气体浓度参数、设备运行状态与空间位置信息，精准筛选存在气体溢出特征的密封点位。检测工作筛查出的异常点位会纳入专项检修清单，检修人员依据设备运维规范开展密封构件更换、接口紧固、防腐密封处理等作业，所有修复完成的点位会再次进行复测核验，保障密封结构恢复完整密闭性能。标准化的检测与修复流程可提升设备密封体系的完整度，从设备源头把控无组织泄漏问题，适配化工企业长期安全运行的管控需求^[5]。

3 化工企业挥发性有毒气体泄漏分级应急处置核心技术

3.1 微量泄漏工况的原位管控技术

设备密封构件长期运行产生的细微形变、接口缝隙渗透是微量泄漏工况的主要产生原因，该类工况下的气体溢出量较小，空间浓度参数处于较低水平，气体扩散范围仅局限于设备局部区域。现场作业人员接到监测提示后，首先携带便携式检测设备抵达现场，通过多点位分层采样的方式完成区域浓度复测，结合采样数据判定泄漏介质类型、精准锁定泄漏点位，划定局部作业管控范围。

现场人员结合装置整体运行工况制定作业方案,在保障整套生产工艺稳定运行的前提下,对泄漏位置开展密封紧固、密封垫片更换、缝隙封堵等原位修复操作,阻断气体外逸的物理通道。局部通风设备可在作业期间保持运行,流动空气可加速区域内残留微量气体的消散,让空间气体浓度逐步回落至安全标准范围。作业人员在修复操作完成后,持续跟踪区域浓度参数变化,参数保持稳定后解除局部区域的管控状态,完成整套现场处置流程^[6]。

3.2 常规泄漏工况的控源降浓技术

工艺管线、常规阀组出现的密封失效问题会引发常规等级泄漏工况,气体溢出状态保持稳定,区域气体浓度呈现平稳上升的变化趋势,扩散范围可覆盖单套生产装置的作业区域。现场安全管理人员接收系统预警信息后,快速核对泄漏点位对应的工艺系统信息,整合管线布局、物料流向、控制阀门分布等工艺参数,通过远程系统调控与现场设备操作相结合的方式,关闭物料输送控制阀组,切断泄漏设备的物料供给路径,抑制气体持续外溢。

工作人员结合泄漏介质的理化特性选用适配的降浓处置方式,具备水溶性特征的有毒气体可启动区域喷淋雾化系统,水雾颗粒可与空气中的气体分子结合,降低空间气体浓度;非水溶性有毒气体可启动机械通风设备,空气对流作用可加速气体扩散稀释。现场作业人员全程穿戴配套安全防护器具,对泄漏区域进行物理隔离,引导现场作业人员有序撤离,同步记录处置全过程的浓度变化数据,根据参数变化调整设备运行强度,待空间气体浓度恢复安全标准后开展设备深度检修与工况复盘工作^[7]。

3.3 大范围泄漏工况的全域应急处置技术

设备本体破损、主干管线开裂、核心阀门失效等突发设备故障,会引发大范围气体泄漏工况,气体瞬时溢出量较大,扩散速度更快,影响范围可覆盖多套生产装置及厂区公共区域。企业应急控制系统接收监测设备的超限信号后,即刻启动全域预警机制,联动厂区分布式控制系统完成关联生产装置的联锁停机操作,切断对应工艺系统的物料输送与能源供给,规避各类衍生安全问题的产生。

应急工作团队依据专项应急预案开展分区作业,工作人员划分警戒管控边界,落实厂区出入口管控机制,完成现场人员的分层疏散工作,保障厂区人员作业安全。技术人员依

托专业检测设备开展全域浓度摸排,梳理气体扩散边界与高浓度聚集区域,结合现场风速、温度、气压等气象参数判断气体后续扩散趋势。现场布设移动式喷淋设备与强力通风装置,构建多层级气体稀释体系,持续降低全域空间的气体浓度。应急指挥人员同步统筹物资调配、环境监测、工况研判等配套工作,动态调整处置作业节奏,逐步消解大范围泄漏工况带来的安全影响,维持厂区整体运行环境的稳定状态^[8]。

4 结论

有毒气体泄漏防控工作是化工安全生产管理的核心模块,监测技术的合理运用与应急处置流程的规范落实,直接决定厂区安全管控成效与生产系统运行稳定性。不同监测技术适配差异化生产场景,分级处置模式可以对应各类泄漏工况的管控需求,多类技术融合运用能够健全全链条风险防控体系。化工企业可结合自身生产工艺与厂区布局,优化监测点位布设方式,细化应急处置流程,完善智能化安全防控架构,强化气体泄漏风险管控能力,助力化工行业安全生产体系稳步升级。

[参考文献]

- [1] 翁静, 袁盼, 王铭赫, 等. 基于支持向量机的泄漏气体云团热成像检测方法[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 104-111.
- [2] 齐胜, 单海鸥, 罗林, 等. 融合格拉姆角场的深度特征学习在痕量气体浓度识别中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 55-65.
- [3] 谷小婧, 林昊琪, 丁德武, 等. 基于红外气体成像及实例分割的气体泄漏检测方法[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2023, 49(1): 76-86.
- [4] 王伶俐, 李海燕, 陈程, 等. 长三角北部沿海城市2018年大气VOCs分布特征[J]. 环境科学学报, 2020, 40(4): 1385-1400.
- [5] 江逸远, 谷小婧, 顾幸生. 基于红外视频的VOCs泄漏源定位与气羽实例分割[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2024, 50(5): 695-707.
- [6] 张树琨. 石化行业挥发性有机物污染管控措施研究[D]. 燕山大学, 2022.
- [7] 赵晓飞, 陈国兴. 从《政府工作报告》看行业热点[J]. 中国石油和化工, 2021(3): 14-23.
- [8] 迟晓铭, 肖安山, 朱亮, 等. 石化企业气体泄漏红外成像检测技术研究进展[J]. 安全、健康和环境, 2021, 21(2): 1-5.