

带毒性负荷的天然气净化厂 应急疏散方案研究

李华军

胜利通海油田服务股份有限公司

摘要: 本文研究了天然气净化厂硫化氢泄漏事故下的应急疏散方案,分析了工艺装置潜在泄漏风险及毒性负荷对人员伤害的影响。通过构建 192 个泄漏场景并运用 K-means 聚类筛选代表工况,结合三维地形建模与 TNO 毒性模型,建立毒性负荷驱动的疏散优化路径。研究表明,基于毒性负荷的路径选择可显著降低致死概率,优于传统最短路径方案,为高危化工场所突发事故下的疏散决策提供了科学依据。

关键词: 毒性负荷; 应急疏散; 天然气净化厂

天然气净化厂作为高危化工场所,其泄漏事故具有突发性强、扩散速度快、毒性伤害重等特点,特别是硫化氢等有毒气体泄漏,极易对周边居民造成严重威胁。因此,构建科学有效的应急疏散方案,是提升事故响应效率、减少人员伤亡的关键^[1]。

1 天然气净化厂事故风险分析

1.1 净化厂概况

1) 厂区与运行情况。本净化厂为我国首座按照国家一类商品天然气质量标准设计建设的天然气净化厂,具备先进的环保处理能力,实现了尾气与 SO₂ 最低排放速率和污水“零排放”目标。装置日处理能力达 1000 万 m³,采用“两列装置并联”设计,总规模为 1200 × 10⁴ m³/d,处理气体中硫化氢浓度高达 29.6 g/m³,属高风险的三级站场。厂区分为主生产区与辅助生产区,分别位于厂区东、西两侧,功能明确。周边 500 m 范围内无重要公共建筑,东侧 150 m 内民房已拆迁,南侧两处民房已在 2021 年整改;西侧与北侧分别为电力线路与山坡,具备良好的天然缓冲条

件。气候属亚热带湿润季风区,主导风向为北风,多年平均风速 1 ~ 3 m/s。

2) 工艺流程简介。天然气净化过程主要包括物理分离、脱硫、脱水、硫磺回收与尾气处理 5 大环节。原料气经多级分离(如重力分离、过滤和精密过滤)后,去除水分与杂质进入 MDEA 脱硫单元,在吸收塔内去除酸性气体后,溶剂通过闪蒸塔、再生塔进行再生并循环使用。脱硫后湿气进入 TEG 吸收塔进行脱水处理,经富液闪蒸、重沸精馏后将水分去除,生成干气输送至配气站。酸气经分离器脱水后送入燃烧炉高温燃烧,回收硫磺。尾气进一步通过焚烧炉和 SCOT 装置处理,实现低污染排放,废水和固废则经专用装置处理或回收利用,确保系统闭环运行和环境达标^[2]。

1.2 工艺装置危险因素分析

1) 脱硫单元。脱硫单元涉及 MDEA 吸收塔、闪蒸塔、再生塔等关键设备,运行中易出现压差异常及气体窜压事故。由于设备间操作压力差异明显,若液位控制或联锁阀失效,可能导致高压气体窜入低压设备,引发超压爆炸。该单元多处接触含 H₂S 和 CO₂ 的

高腐蚀性介质,塔体焊缝、接头、阀门及换热器等部位易发生腐蚀穿孔,造成气体泄漏,甚至引发火灾或中毒事故。原料气管道、过滤分离器等也存在腐蚀疲劳、氢致裂纹(SOHIC)等隐患,特别是在维护不及时或材料选用不当时风险更大。

2) 脱水单元。脱水装置主要依赖 TEG 吸收塔、闪蒸罐、再生塔等构成天然气干燥流程。运行中若吸收塔液位过低或联锁失效,天然气可能直接进入闪蒸罐,形成气体聚集并引发爆炸;闪蒸罐液位异常或压力波动也可能导致气体倒灌至再生系统,影响稳定运行。虽相较于原料气处理装置,脱水单元的腐蚀性略低,但长期运行中,二氧化碳、水蒸气等介质仍对设备内部造成侵蚀,增加垫圈老化、阀门失效的可能。脱水系统还涉及高温操作,如再生塔顶部与重沸器之间存在烫伤风险,必须加强热表面绝热处理与巡检管理^[3]。

3) 硫磺回收装置。硫磺回收装置处理脱硫产生的酸气,是含硫气体集中燃烧与回收的高风险区域。酸气分离器若腐蚀泄漏,易造成作业人员 H₂S 中毒;

燃烧炉若在突发停机或断电情况下酸气未能及时切断,极易发生爆燃事故。燃烧过程中高温持续存在,炉内耐火材料若脱落或管道热疲劳损坏,极易引发穿孔、红管甚至爆炸。余热锅炉在承压运行中存在多重风险,如水质不合、换热器结垢或腐蚀会引起高温破裂,严重时发生汽包爆炸。

4) 尾气处理系统。尾气处理装置通过焚烧炉对 SCOT 系统或硫回收后的残余气体进行最终净化,安全风险集中在点火、停电及燃烧效率问题。若突遇断电或点火失败,尾气未能充分燃烧,将导致高浓度含硫气体(如 H_2S 、 SO_2) 通过烟囱直接排放,危害环境与人员健康。燃烧炉若操作不当,如燃气未关闭即重新点火,极易引发爆炸事故。

2 周边区域高精度实景三维模型构建

2.1 模拟扩散与采集区域确定

1) 利用 PHAST 模拟硫化氢扩散范围。为科学划定高精度三维建模范围,本研究基于 PHAST 软件进行硫化氢扩散模拟。采用 UDM 模块对天然气泄漏过程进行准瞬时与有限时间耦合建模,在假设泄漏速率不变条件下,输入典型气象与管道参数,模拟大孔径(100mm)泄漏时的扩散过程,输出多阶段气云范围图与下风向浓度云图,为区域建模提供空间参考依据,如图 1 所示。

2) 确定 20 ppm 浓度影响半径。依据《AQ2017—2008 含硫化氢天然气井公众危害程度分级方法》规定,硫化氢浓度达到 20 ppm 即为公众危害阈值。模拟结果表明,在 20℃、风速 1 m/s 等典型条件下, H_2S 最大传播距离可达 940 m。该影响半径作为应急响应与模型精度控制的重要边界,为疏散路径规划提供关键支持^[4]。

3) 划定采集范围。考虑泄漏不可控性、持续泄漏情况下的气体积聚效应及下风向扩散特征,同时结合设备布设

范围、疏散路径覆盖与建模成本等因素,最终确定以净化厂为中心,半径 5 km 区域为高精度三维地理信息采集范围。该范围既覆盖潜在影响区域,又满足影像处理和模型生成的效率需求。

2.2 三维模型数据获取与处理

1) 三维地理信息外业采集。本研究选用大疆 M300 RTK 无人机搭配睿博 DG3 五镜头倾斜相机开展航空摄影,具备良好的图传、定位与成像精度。在规划飞行任务前,布设 5 个油漆喷绘像控点并利用南方 RTK 仪器完成高精度坐标测量。飞行高度设为 280 m,航向/旁向重叠度分别为 85% 与 80%,确保影像完整性与三维重建效果。

2) 影像数据内业建模处理。采用 Bentley 公司开发的 ContextCapture 软件进行影像数据的空三测量与三维建模处理。首先创建项目与区块并导入影像,开展初步空中三角测量;随后,通过图像与实测像控点关联,进行第二次空三优化以提升模型定位精度。系统通过多视图匹配与光束平差生成高密度点云及 TIN 网格模型,并进一步映射实景纹理,实现三维地貌的可视化复原,为后续泄漏模拟与路径分析提供数字地形基础。

3) 地形模型构建与优化处理。实景三维模型虽精度高,但直接用于 CFD 建模计算负担过重。为平衡模型精度与计算效率,采用 ArcGIS 对影像生成的 DEM 进行 8 m × 8 m 等间距抽样,并导出经纬度与高程数据。随后,利用 Gambit 软件根据坐标生成曲面地形,再导入 ANSYS Design Modeler 构建体模型并设置泄漏口位置。

2.3 区域居民分布信息统计

1) 实地走访调查受影响区域居民点。为制定科学的疏散方案,本研究通过实地走访的方式,详细调查了厂区周边 5 km 范围内的居民分布状况。通过逐点核查,记录居民房屋的位置、方向、距离主装置的直线距离以及人口数量等信息,为后续人居三维可视化与分组疏散方案提供基础数据支撑。

2) 居民点分组疏散策略设计。结合居民点的地理位置及疏散路径可达性,将空间相邻、疏散路线接近的居民点划为同一疏散组。此策略有助于疏散指令的统一发布与指挥,也便于设置临时避难点及交通疏导方案。分组疏散方式能有效提高应急响应速度、减少混乱增强整体疏散效率与安全性。

3) 制作三维模型中人居分布图。借助高精度三维实景模型,将调研得到的居民点位信息叠加至三维模型中,完成疏散区域人居分布的空间可视化。

4) 汇总居民人数与距厂区主装置距离。通过数据汇总,整理出居民点人数及其距净化厂主装置的距离。统计结果表明,厂区 500 m 范围内无敏感点,居民分布零散但多数集中在南侧,最近居民点距主装置 348 m。该数据作为疏散模拟与风险等级划分的重要依据,可用于建立基于距离和人口密度的应急响应等级体系。

3 气体泄漏场景集构建及典型场景选取

3.1 泄漏场景集构建

1) 风场集构建。为全面描述气体

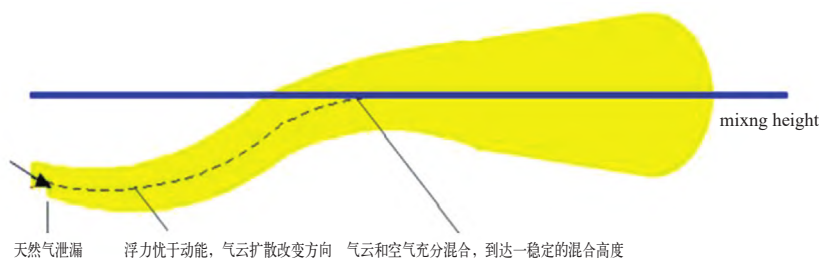


图 1 UDM 气云扩散模拟图

泄漏过程中的气象影响因素,本文基于安岳县近年气象数据构建风场集。风向选取最常见的8个方向,风速则按照区域最大最小风速范围进行等差分段,划分多个风速子集。每个子集用其平均值代表具体风速,从而形成8个风向与多个风速区间组合而成的风场集,为后续泄漏情景模拟提供真实可靠的气象基础。

2) 泄漏源集构建。泄漏源集的构建基于厂内关键装置的潜在泄漏位置与典型孔径组合。按照设备工况与风险特性,将孔径划分为小孔、中孔、大孔及破裂四类。每一类孔径对泄漏速率与气体扩散范围影响显著,通过与不同装置(如脱硫、脱水、硫回收等)组合,构建多组可能发生泄漏的源项。该集合系统性反映了事故发生的多样性,为全面构建场景奠定基础^[5]。

3) 场景集形成。将风场集与泄漏源集进行笛卡尔积组合,得到完整的泄漏场景集。每一组风速、风向与特定装置及孔径组合对应一个独立的泄漏工况,全面覆盖不同气象和设备状态下的事故情景。最终形成192个泄漏场景,构建了一个高维、全覆盖的泄漏场景空间,为后续典型工况筛选与聚类分析提供详实数据支撑。

3.2 基于 K-means 的场景缩减方法

1) 算法流程设计。采用 K-means 对泄漏场景集进行聚类,首先对样本数据进行 Z-score 标准化处理。随后使用轮廓系数法确定聚类簇数 K。聚类过程中,以欧氏距离计算各场景与簇中心的距离,并结合泄漏场景的发生概率进行加权处理,实现对高概率重要情景的优先保留。

2) 典型场景选取规则。聚类完成后,根据“距离×概率倒数”原则,从每个簇中选取乘积最小的场景作为该簇代表。该规则确保所选场景既具代表性又具发生可能性,避免遗漏关键场景,同时压缩冗余,提升仿真效率,为

应急路径设计等后续工作提供简化工况支撑。

3.3 典型泄漏场景选取实例

1) 场景集初建。通过组合8种风向、多级风速与4类孔径,共构建192种泄漏情景,涵盖各类可能的工况条件。该场景集全面反映天然气净化厂在不同气象及设备状态下的泄漏特征,为定量风险分析与应急响应模拟提供多维基础。

2) 概率分布分析。对192个场景进行发生概率统计后发现,发生概率在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 的场景占比达93.92%,而高于 10^{-5} 的场景合计覆盖99.26%。因此,将发生概率 $\geq 10^{-5}$ 的场景作为保留对象,有效缩减低概率工况,减少计算负担。

3) 聚类结果提取。采用 K-means 对高概率场景集进行聚类分析,最终从192个场景中筛选出18个代表性典型情景。每个代表场景对应一个聚类簇中心,既反映工况多样性,又具备统计代表性,为后续泄漏扩散模拟与疏散策略优化提供精准输入。

4 考虑毒性负荷的应急疏散方案研究

4.1 应急避难点选取

1) 安全性。避难点安全性是选址首要考虑因素。应远离硫化氢泄漏可能源,避免因距离过近产生毒气聚集或二次伤害风险。同时,避难点周边建筑需具备较高安全等级,避免灾害引发倒塌堵塞通道或增加伤亡风险。另需结合模拟结果,确保选址处 H_2S 浓度长期低于10ppm,避免中毒或致死风险。合理控制距离与环境条件,是确保疏散后人群生命安全的基本前提。

2) 可达性。避难点应便于快速抵达与救援支持,优先选取靠近主干道或等级较高道路的地点,以确保人员和物资通行顺畅。同时,应考虑与最近医院、公安机关和消防队的距离。避难点越靠近这些设施,救治、秩序维护与灭火救

援越及时高效,疏散过程的安全性也越高。可达性决定了避难点能否在黄金时间内发挥应急功能。

3) 有效性。有效性主要指避难点的容纳与疏散组织能力。应选择具有多个出入口、场地开阔的区域,如操场、空地等,以降低人员集中带来的疏散阻力。面积越大,可容纳的人数越多,有利于分散密度、避免踩踏与混乱。选址时应综合考虑避难点现有容量和可用空间,确保在短时间内安全接收附近全部疏散人群,实现高效避险。

4.2 疏散速度分析

1) 路网分级。厂区周边疏散道路按照通行条件和宽度分为主干道、机耕路、小路三类。主干道为宽度较大、通行条件较好、适合大规模快速疏散的路线;机耕路多为乡村半硬化道路,具备一定通行能力;小路则为通村或田间小径,宽度和道路条件较差,仅适合少量人员通行。路网分级有助于在模拟与规划中对不同路径赋予合理疏散速度参数,提高疏散策略的准确性与实用性。

2) 疏散速度受地形与人群结构影响。厂区周边地形复杂,存在显著高差与坡度,导致疏散过程中行走速度降低。同时,乡村道路多为非铺装路面,弯道多、附着力差,也影响疏散效率。此外,人员构成是影响速度的另一重要因素。研究表明,不同性别与年龄段的个体疏散速度存在明显差异,需根据人群结构合理设定速度参数。综合地形与人群因素,疏散速度需做动态调整以匹配实际情形。

3) 常住人群以老人和儿童为主,速度偏慢。据调查,厂区周边常住人口中,老年人与儿童占比高达89.1%。老年人普遍存在行动迟缓、反应较慢的问题,儿童则在疏散过程中易出现恐慌和依赖行为,需他人协助。这些群体的疏散速度显著低于青壮年,显著影响整体疏散进程。因此,在制定疏散计划时应优先考虑低速群体的避让与保障需求,

合并合理设置引导人员和路线优先级。

4.3 毒性负荷及伤害概率

1) 引入 TNO 模型计算毒性负荷。为量化疏散过程中人员所承受的毒性暴露风险,本文引入荷兰 TNO 绿皮书中提出的毒性负荷模型。该模型以毒物浓度 C 、暴露时间 t 和毒物特性常数 n 为参数,采用公式 $T_d=C^n t$ 计算毒性负荷 T_d 。该模型能较好地反映毒气在人体内的蓄积效应,尤其适用于模拟如硫化氢这类高毒性气体在不同时间浓度条件下对人员健康的威胁,是应急疏散风险评估的基础工具。

2) 离散路径段估算毒性暴露累积值。在具体路径模拟中,人员在疏散过程中不断穿越不同气体浓度区域,为计算其毒性暴露累积量,本文采用路径离散化方法。将疏散路径划分为多个微小路段,每段对应时间区间,通过数值积分形式估算路径上的总毒性负荷。该方法能动态捕捉气体扩散变化与人员位移之间的交互,从而提高毒性负荷估算的准确性,支撑后续致死风险评估与路径优化。

3) 计算致死概率 P_d ,并考虑扩散时间影响。在获得毒性负荷 T_d 后,本文进一步采用经验函数将其转换为致死概率 P_d 。根据毒物特性常数 $A=-29.415$ 、 $B=1.443$,可得 $V=A+B\ln(T_d)$,进而代入 Logistic 函数计算 P_d 。此外,气体扩散时间直接影响毒性负荷累积值,扩散时间越长,毒气浓度维持时间越久,致死概率显著上升。因此应急响应越快、疏散越早,越能有效降低毒性暴露与死亡风险。

4.4 实例分析

1) 北风工况下泄漏场景模拟与路径评估。根据安岳地区风玫瑰图统计,全年主导风向为北风,频率占比 38.9%。因此本节以北风为主导情形,模拟含硫天然气在 2 m/s 风速、环境温度 20℃、泄漏持续 900 s 的极端条件下的扩散情景。使用 CFD 模型模拟硫化

氢气体在复杂地形中扩散路径,并结合高精度三维地理模型,叠加疏散路径和人口分布图,评估各路径所处区域的毒性负荷分布。模拟结果表明,主风下风区域形成高浓度毒云,严重威胁一级风险区内居民生命安全,需优先考虑远离风向主通道的避难路线与点位布设。

2) 计算不同疏散路径下毒性负荷与致死概率。根据建模后得到的浓度时空分布数据,分别对所有候选疏散路径进行毒性负荷计算。以路径段划分为单位,按照每段气体浓度与人员停留时间积分求解毒性积累值。进而根据 TNO 模型推导致死概率。结果显示,不同路径在长度相近的情况下,由于途经区域浓度差异,毒性负荷和致死风险存在明显差距。

3) 对比 600 s 与 900 s 泄漏情况下不同路径的毒害程度。为评估响应时间对疏散成效的影响,本文对 600 s 与 900 s 泄漏扩散条件下的各路径毒性负荷与致死概率进行了对比分析。结果表明,延迟 300 s (从 600 s 延至 900 s) 将显著加剧毒性暴露。以 S14-S8 路径为例,毒性负荷从 3.30×10^9 升高至 3.73×10^{10} ,增长超 10 倍,致死概率由 0.18 上升至 0.23。由此可见,泄漏事故发生后若响应延迟,毒性积累将急剧增加,极易导致人员致死率上升,充分说明“早疏散、少损伤”的应急原则至关重要。

4) 基于毒性负荷 vs. 最短路径的方案优劣对比。对比疏散路径的最短距离方案与毒性负荷最优方案,发现两者在路径长度和致死概率方面呈现明显分歧。例如,从 S7 点出发,最短路径为 S7-S2-S3-S5,全长 901.26 m,毒性负荷高达 5.84×10^{10} ,致死概率 0.22。而毒性负荷最小的路径 S7-S13-S12 虽长达 1600.22 m,但毒性负荷仅为 5.96×10^9 ,致死概率为 0.17。可见,传统最短路径策略在毒气扩散条件下存在致命缺陷,选取疏散路径应以暴露最小为优化目标,兼顾安全性和时效性。

5) 推荐最优疏散路径图与风险区分级对策。结合毒性负荷分析结果,最终推荐路径 S7-S13-S12 作为最优疏散方案。尽管路线较长,但所经区域气体浓度较低,人员暴露风险最小。在此基础上,针对不同风险等级区域制定分级对策:一级风险区 (浓度 >100 ppm) 内居民建议配备空气呼吸器,以防极端情况下短时间致死;二级风险区 (20 ~ 100 ppm) 居民应配置智能预警系统,提前启动疏散机制。

5 结语

本文结合天然气净化厂的实际工况和周边环境特征,构建了多场景气体泄漏模型,并引入毒性负荷评估方法与数学优化模型,系统分析了疏散路径的毒性暴露与致死风险。研究表明,传统以最短路径为目标的疏散策略存在明显局限,基于毒性负荷优化的疏散路径能显著降低致死概率。本研究为高风险化工场所的应急预案制定提供了科学支撑,也为今后城市安全疏散决策提供了参考。

参考文献:

- [1] 吕洋,蔡喜洋.天然气加气站事故影响范围及处置对策研究[J].化工安全与环境,2024,37(08):14-19.
- [2] 王黎宏,谢媚.输气管道消防设备设施安全管理[J].石化技术,2024,31(07):341-343.
- [3] 亓文广,蔡文玉,黄韶丹,等.长输天然气管道压气站消防安全常见问题与对策研究[J].消防界(电子版),2023,9(23):16-18.
- [4] 姚琪,刘洪威.天然气场站火灾危险性消防管理探析[J].消防界(电子版),2023,9(21):13-15.
- [5] 卫杰,杨精伟,修连强.长输天然气管道事故应急疏散间距研究[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(22):7-8.