

液化天然气储罐泄漏事故危害范围的模拟分析

王崇男 (山西华新液化天然气集团有限公司, 山西 太原 030032)

摘要: 在全球能源结构转型、LNG 广泛应用的背景下, LNG 储罐泄漏风险日益凸显。本文研究了 LNG 储罐泄漏事故的基本原理分析了泄漏口径、气象条件、地形地貌、储罐类型等因素对危害范围的影响, 探讨了早期监测与预警、人员疏散、事故响应体系及储罐设计优化等应急防控措施。研究成果对提升 LNG 存储安全、降低事故危害具有重要现实意义, 能为相关企业、部门制定安全策略及应急预案提供理论依据与实践指导。

关键词: 液化天然气; 储罐泄漏; 危害范围; 应急防控

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 016-0157-03

Simulation analysis of the hazard range of liquefied natural gas tank leakage accidents

Wang Chongnan (Shanxi Huaxin Liquefied Natural Gas Group Co., Ltd., Taiyuan Shanxi 030032, China)

Abstract: Against the backdrop of global energy structure transformation and widespread use of LNG, the risk of LNG tank leakage is becoming increasingly prominent. This article studies the basic principles of LNG tank leakage accidents and analyzes the impact of factors such as leakage diameter, meteorological conditions, topography, and tank type on the scope of harm. It explores emergency prevention and control measures such as early monitoring and warning, personnel evacuation, accident response system, and tank design optimization. The research results have important practical significance for improving LNG storage safety and reducing accident hazards, and can provide theoretical basis and practical guidance for relevant enterprises and departments to formulate safety strategies and emergency plans.

Keywords: liquefied natural gas; Tank leakage; Scope of harm; Emergency prevention and control

随着全球能源结构的加速转型, 液化天然气 (LNG) 作为清洁高效的能源在能源供应体系中的地位愈发关键。然而, LNG 储罐泄漏事故频发, 其潜在危害对生命、财产及环境构成巨大威胁。在此背景下深入剖析 LNG 储罐泄漏事故的基本原理、危害范围影响因素、应急防控措施等内容, 对于提升 LNG 存储安全水平、降低事故风险意义重大这也是本文研究的核心方向。

1 液化天然气储罐泄漏事故的基本原理

1.1 液化天然气的物理化学特性

液化天然气 (LNG) 主要由甲烷构成其具备独特的物理化学性质, 在物理特性上, LNG 呈现为无色透明液体, 密度约为 $420\sim 470\text{kg/m}^3$ 相较于水密度更低。气液体积比极大在标准状况下, 1 体积的 LNG 可气化为约 600~625 体积的天然气。其沸点极低通常在 -162°C 左右, 这使得 LNG 在常温常压下极易发生蒸发。

从化学特性看 LNG 具有易燃易爆性, 其爆炸极限范围处于 5%~15% (体积分数), 一旦泄漏并与空气混合达到该浓度区间, 遇火源便可能引发剧烈燃烧甚至爆炸。同时 LNG 基本无毒, 但大量泄漏后其蒸发气会稀释周围空气, 导致氧气含量降低存在使人窒息的风险。

1.2 LNG 储罐的结构与运行机制

LNG 储罐一般采用双层金属结构以保障储存安全

与高效, 内罐直接用于储存 LNG, 多采用 9% 镍钢等低温性能良好的材料, 确保在极低温环境下仍能维持结构稳定性。外罐则起到保护和隔热作用常采用碳钢材质, 内外罐之间填充有高性能的保温材料, 如珍珠岩等, 大幅降低热量传递减少 LNG 的蒸发损耗。在运行机制方面, 储罐通过压力控制系统维持内部压力稳定。当压力过高时安全阀开启泄压; 压力过低时通过补充气相天然气或加热 LNG 等方式提升压力。同时储罐配备有液位监测装置, 实时监控 LNG 的储存量。在输送过程中利用低温泵将 LNG 从储罐抽出, 经过气化器转化为气态后输送至管网供用户使用。整个运行过程需严格遵循相关安全标准与操作规程以保障储罐安全稳定运行。

2 泄漏事故危害范围的影响因素分析

2.1 泄漏口径与泄漏速率的影响

泄漏口径与泄漏速率密切相关是决定危害范围的关键初始因素, 根据流体力学原理泄漏速率可通过相关公式计算, 如伯努利方程结合实际情况进行修正。泄漏口径越大在储罐内外压力差作用下, 单位时间内泄漏的 LNG 量越多, 泄漏速率就越快。快速泄漏使得大量 LNG 在短时间内释放到环境中, 其蒸发形成的可燃气体云团规模迅速扩大, 火灾、爆炸等潜在危害范围也随之大幅增加。大口径、高泄漏速率的泄漏事故

可能导致周边数百米甚至上千米范围内都处于危险区域。

2.2 气象条件（风速、风向、温湿度等）对扩散范围的影响

气象条件对 LNG 泄漏后的扩散过程起着至关重要的作用，风速直接影响气云的扩散速度与范围，较高风速能加速气云的扩散使气云在水平方向迅速延展，但同时也可能稀释气云浓度降低局部危险程度。例如在风速为 5m/s 的情况下，气云在 10 分钟内可扩散至距离泄漏点 500m 处；当风速提升至 10m/s，相同时间内气云扩散距离可达 1000m。风向决定了气云扩散的方向，危害区域会沿着风向呈扇形分布。如某 LNG 储罐泄漏事故中，风向为东南风导致储罐东南方向的居民区受到严重威胁。温湿度也有不可忽视的影响，温度升高会加快 LNG 的蒸发速率增加气云产生量；湿度较大时水蒸气可与 LNG 蒸发气相互作用，影响气云的扩散路径与浓度分布^[1]。

2.3 地形地貌对气体扩散行为的作用

地形地貌显著改变 LNG 泄漏后气体的扩散行为，在平坦开阔地形中，气云扩散相对较为规则主要受气象条件主导。然而在复杂地形如山区、丘陵地带，山谷可形成“狭管效应”，加速气云流动并使其在山谷内聚集增大局部浓度。山坡则会影响气云的爬坡与下坡过程，改变其垂直方向的扩散路径。若周边存在建筑物等障碍物，气云会在障碍物周围发生绕流与堆积导致局部区域浓度异常升高。例如在城市中，LNG 泄漏后气云可能在高楼大厦间迂回，在背风面形成高浓度聚集区扩大潜在危害范围。

2.4 储罐类型及存储压力对事故后果的影响

不同类型的储罐在发生泄漏时风险特性各异，常压储罐结构相对简单，一旦泄漏压力较低，泄漏初期扩散相对缓慢，但由于其储存量大长期泄漏可能导致大面积污染与危险。真空绝热储罐具有良好的绝热性能，在泄漏初期能一定程度延缓 LNG 的蒸发与泄漏，但当绝热层受损后泄漏情况可能恶化。高压储罐泄漏的 LNG 能以较高速度喷射而出更远距离地扩散，并且更容易形成大面积可燃混合气云，极大增加火灾、爆炸的危害程度与范围。

2.5 事故环境下可能的次生灾害

LNG 泄漏后极易引发次生灾害，当泄漏的 LNG 与空气混合形成可燃混合气，且浓度达到爆炸极限范围遇到火源便会引发爆炸。爆炸瞬间释放巨大能量产生强烈的冲击波，可摧毁周边建筑物、设备，造成严重人员伤亡与财产损失。爆炸引发的火灾其热辐射范围广，能使周围易燃物迅速燃烧进一步扩大危害区域。

3 泄漏事故的应急防控措施

3.1 泄漏早期监测与预警机制优化

早期监测与预警机制是应对 LNG 泄漏事故的第一道防线，先进的传感器技术是实现精准监测的核心，如光纤传感器能够利用光信号变化，对储罐的温度、压力以及液位等参数进行实时、高灵敏度的监测，其测量精度可达 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 0.01\text{MPa}$ 以及 $\pm 1\text{mm}$ 。红外传感器则能通过检测气体的红外吸收特性，快速且准确地捕捉周边环境可燃气体浓度的变化。智能监测系统将这些传感器收集的数据进行整合，运用数据挖掘算法对海量历史数据进行深度分析，建立正常运行模式下的参数模型。

一旦实时监测数据偏离该模型设定的阈值范围，机器学习算法便迅速介入，通过多维度数据分析准确判断异常情况是否由泄漏引起。一旦确认风险系统立即通过多种高效的预警渠道，如与工作人员手机绑定的短信预警、现场高分贝声光警报等，在第一时间向相关人员发出警报，确保能在泄漏初始阶段及时采取措施遏制事故发展^[2]。

3.2 危害区域内人员疏散策略与安全防护措施

科学合理的人员疏散策略是保障生命安全的关键，在 LNG 泄漏事故发生后，需依据前期模拟分析得出的危害范围结合事故现场的地形地貌，如是否存在山地、河流等阻碍因素，以及人员分布情况，包括工厂内不同区域的工作人员数量、周边居民区的人口密度等，来制定疏散方案。首先精确划分不同危险等级区域，高危险区域需优先疏散。根据地形规划多条安全疏散路线确保路线平坦、宽阔且无障碍物，同时在路线沿途设置大量醒目的疏散指示标识，采用发光材料制作保证在夜间或烟雾环境下也清晰可见。

在疏散过程中组织经过专业培训的人员，手持扩音器有序引导群众按照预定路线撤离，控制人员行进速度防止出现拥挤和踩踏事故。为处于危害区域内的人员配备符合标准的安全防护装备，如针对 LNG 泄漏环境设计的防毒面具，能够有效过滤 LNG 蒸发气中的有害成分，防火服则可抵御可能发生的火灾热辐射。疏散出来的人员被集中安置在远离事故现场的安全区域，现场设立临时医疗救助点，配备专业医护人员和必要的医疗设备为受伤人员提供及时的救治，同时保障疏散人员的基本生活需求如提供食物、饮用水等。

3.3 事故响应体系建设与多部门联动机制

构建完善的事故响应体系是高效应对 LNG 泄漏事故的基石，企业应制定详细且极具可操作性的应急预案，预案内容涵盖从事故报告、现场应急处置到后期环境恢复、设备修复等各个阶段的具体流程。明确各

部门和人员在事故中的职责与任务,例如现场指挥人员负责全面协调,技术人员负责评估泄漏情况并提供技术支持。建立多部门联动机制涉及消防、环保、医疗、公安等多个关键部门。

消防部门凭借专业的灭火设备和丰富的应急经验,在第一时间赶赴现场利用泡沫灭火剂等控制 LNG 泄漏引发的火灾,并采用专业工具对泄漏源进行封堵。环保部门携带先进的环境监测设备,对事故周边大气、土壤和水体中的污染物扩散情况进行实时监测,分析污染趋势为后续环境修复提供数据支持。

医疗部门迅速搭建临时医疗救助点,对受伤人员进行紧急救治和转运。公安部门负责在事故现场周边设置警戒区域,实施交通管制,维持现场秩序确保救援工作顺利进行。通过定期开展联合演练,模拟不同场景下的 LNG 泄漏事故检验和优化多部门联动机制,不断提高各部门之间的协同作战能力和应急响应速度。

3.4 LNG 储罐设计优化与本质安全提升

提升 LNG 储罐的本质安全水平是预防泄漏事故的根本途径,在储罐设计阶段严格遵循国际先进的设计标准,选用优质的低温钢材,如 9% 镍钢其具备出色的低温韧性和强度,能够在 LNG 储存的极低温度环境下保持良好的力学性能。优化储罐结构采用双层罐壁设计,内层罐壁直接接触 LNG,承受压力和低温外层罐壁起到保护和隔热作用,两层之间填充高效的保温材料,如珍珠岩有效减少热量传递降低 LNG 的蒸发损耗。

同时在储罐上设置多重安全保护装置,紧急切断阀能够在检测到异常泄漏时,迅速切断 LNG 的输送管道防止泄漏扩大;安全阀则在储罐压力过高时自动开启泄压保障储罐安全;压力监测装置实时反馈储罐内压力变化,为安全运行提供数据依据。定期对储罐进行全面检测运用无损检测技术,如超声波检测、射线检测等,排查储罐焊缝、罐体等部位是否存在缺陷。及时对发现的问题进行维护和升级,消除潜在安全隐患确保储罐始终处于安全运行状态^[3]。

例如位于某沿海地区的大型 LNG 接收站在日常运行中,其光纤传感器监测系统于凌晨 3 点左右检测到一座 LNG 储罐的压力出现异常上升趋势,压力变化速率远超正常波动范围。智能监测系统迅速启动数据分析程序,通过对比历史数据和实时监测数据初步判断可能存在轻微泄漏导致压力异常。随即系统触发短信预警,向站内值班人员和相关管理人员发送警报信息,同时现场声光警报器开始工作。站内应急响应体系立即启动,值班人员迅速通知消防、环保、医疗和公安

等部门。消防部门在接到通知后的 5 分钟内出动消防车赶赴现场,车上配备了针对 LNG 火灾的泡沫灭火剂和专业灭火设备。

环保部门携带便携式大气污染物监测仪、水质检测设备,第一时间前往事故现场周边区域,准备对环境进行监测。公安部门迅速在接收站周边设置警戒区域拉起警戒线,对周边道路实施交通管制引导过往车辆绕行。站内工作人员依据预先制定的人员疏散策略,通过广播系统通知危害区域内的工作人员和周边少量居民疏散。疏散引导人员手持扩音器,组织大家沿着既定的疏散路线有序撤离,同时为疏散人员发放防毒面具确保安全。

医疗部门在接收站外的安全区域搭建临时医疗救助点,准备对可能受伤的人员进行救治。消防人员到达现场后立即对储罐周边环境进行评估,利用消防水枪对储罐进行冷却,防止因温度升高导致泄漏加剧并寻找泄漏源。经过仔细排查,发现一处管道连接处出现微小裂缝导致 LNG 泄漏。消防人员在技术人员的配合下,采用专业工具对裂缝进行封堵成功控制住泄漏。环保部门在事故周边不同方位设置监测点,实时监测大气中可燃气体浓度和环境污染浓度,未发现污染物扩散到周边敏感区域^[4]。

在此次事件中得益于完善的早期监测与预警机制、高效的事故响应体系以及多部门联动机制,成功避免了一场可能发生的重大 LNG 泄漏事故。事后接收站对此次事件进行详细复盘,对储罐的压力监测系统升级提高监测精度和预警准确性,同时对储罐的设计进行全面评估,考虑在易泄漏部位增加冗余保护装置进一步提升本质安全水平。

4 结语

综上所述,本文系统剖析了 LNG 储罐泄漏事故的基本原理、危害范围和影响因素,深入探讨了应急防控措施。研究表明多因素共同作用决定了事故危害程度,未来应持续优化监测预警技术、强化多部门协同,进一步完善应急防控体系,为 LNG 产业安全、稳定发展筑牢坚实基础助力能源领域安全与可持续发展。

参考文献:

- [1] 庄学强.大型液化天然气储罐泄漏扩散数值模拟[D].武汉:武汉理工大学,2012.
- [2] 朱伯龄,於孝春.LNG 储罐孔洞泄漏扩散危险区域分析[J].安全与环境工程,2009,16(03):104-108.
- [3] 张海红,王凤琴,毕明树.LNG 储罐泄漏扩散火灾后果分析[J].化学工程与装备,2010(2):4-5.
- [4] 许渊,尹斌,伍蒙,等.某液化天然气储罐泄漏的火灾后果预测[J].山东化工,2018,47(18):167-169.