液化石油气储罐泄漏风险评价的研究

李传保　王建喜　王鹏飞

东营市科德化工有限公司

摘要：液化石油气储罐作为重要的能源存储设施，在日常使用中面临着泄漏、爆炸等潜在风险。由于其易燃易爆的特性，储罐泄漏事故一旦发生，将对人员安全、环境及经济造成严重影响。本文通过结合定性评估方法和定量评估方法，全面评估了储罐泄漏的风险和后果，提出了针对储罐设计、操作、监测及应急响应的防控措施。研究表明，通过优化设计与技术控制和安全操作规程与培训措施，能够有效降低泄漏事故发生的概率及其对人员安全、环境和经济造成的影响。

关键词：液化石油气储罐；泄漏风险评价；应急响应

液化石油气储罐作为储存和运输易燃易爆气体的关键设施，其安全问题直接关系到公众生命财产安全。通过深入探讨液化石油气储罐泄漏的风险评估方法，可以帮助识别潜在的风险源，并通过科学的评估体系评定其风险等级，为安全管理提供量化依据，避免或减少泄漏事故的发生。

1　液化石油气储罐泄漏的风险评估方法

1.1　定性评估方法

1）危害与可操作性研究：危害与可操作性研究是一种结构化的定性风险评估方法，通过系统地分析设备或工艺过程中出现的危险和操作问题，帮助识别潜在的风险和危害。其常用于复杂系统的安全评估，如液化石油气储罐的设计与操作阶段。可以应用于偏差分析，如储罐充装过程中会出现偏差，如充装量过多、充装速度过快、温度过高等。危害识别如充装过程中的过压会导致储罐破裂，或泄漏引发火灾爆炸。

2）失效模式与影响分析：失效模式与影响分析是一种系统化的方法，用于

表 1　失效模式与影响分析（FMEA）示例

失效模式	潜在后果	严重性等级	发生概率	建议措施
储罐泄漏	气体扩散导致火灾或爆炸，威胁人民生命安全	高（9）	中等(5)	定期检查储罐焊缝，安装气体泄漏检测系统
阀门故障	无法关闭储罐，导致液化石油气持续泄漏	高（8）	高（7）	使用防爆阀门，定期校准与维护
温度传感器失效	无法监控储罐内部温度，可能导致过压引发破裂	中（6）	中等(4)	定期更换传感器，配备备用温度监测设备
管道破裂	液化石油气快速泄漏，形成蒸汽云，增加爆炸风险	高（9）	低（3）	加强管道防腐处理，安装泄漏快速切断装置
压力释放装置失效	储罐内部压力持续升高，可能引发爆炸	极高（10）	低（2）	使用高可靠性压力释放装置，定期测试
密封材料老化	接头处发生泄漏，可能导致液态气体挥发成气体扩散	中（5）	中等(4)	定期更换密封件，选用耐高温高压的密封材料
储罐充装量过多	储罐压力超过设计极限，可能引发结构破坏	高（8）	中等(5)	设置自动监控充装量的系统，规范操作流程

识别潜在的失效模式如设备故障、操作错误等及其引发的后果，并评估这些失效模式的严重性和发生概率。其常用于设计阶段或现有系统的风险评估。应用于失效模式识别，例如储罐的泄漏、管道破裂、阀门故障及温度传感器失效等。失效影响评估，如阀门故障可能导致储罐无法关闭，造成液化石油气泄漏，温度过高会导致压力上升，增加爆炸风险。

1.2 定量评估方法

1）风险矩阵法：通过对事件发生的概率和后果的评估，结合矩阵图表，帮助确定和分类风险的优先级。通常，风险矩阵法将风险划分为多个等级，并根据事件的严重性和发生概率制定相应的防控策略。液化石油气储罐的阀门故障有较高的发生概率，其后果严重，因此该风险的优先级会非常高，需要特别关注。

2）蒸汽爆炸评估模型：用于分析液化石油气泄漏后，气体扩散、形成蒸汽云并与空气混合的过程中发生的爆炸事件。蒸汽爆炸评估用于预测爆炸的影响范围、冲击波传播及对周围设施的潜在影响。在液化石油气储罐泄漏的情况下，蒸汽爆炸评估模型可以帮助确定泄漏发生后形成的蒸汽云范围，并预测如果爆炸发生，会波及周围区域，进而采取防护措施，如增加防爆墙、设置安全区等。液化石油气泄漏诱发蒸气云爆炸的数值模拟如图 1 所示。

2 液化石油气储罐泄漏事故的影响评估

2.1 人员安全

液化石油气泄漏后形成的蒸汽云一旦遇到点火源，会引发蒸汽爆炸，爆炸波会导致人员直接伤亡。一旦火灾发生，火焰的高温会迅速烧伤暴露的人员，造成严重的烧伤甚至死亡。火灾也会迅速蔓延，进一步增加人员的伤亡风险，尤其是当火灾持续时间长、火源无法扑灭时，伤害更为严重。另外，液化石油气燃烧时会产生有毒气体如一氧化碳、二氧化碳等，这些气体在空气中的浓度过高时会导致窒息、呼吸困难等健康问题，特别是在封闭环境中。

液化石油气储罐泄漏事故发生时，需要迅速、安全地进行人员撤离。然而，由于气体的扩散速度快且不可见，加上爆炸或火灾会阻断逃生路线，紧急撤离的难度加大，在复杂的储罐区或地下设施中，疏散会面临巨大挑战。为了降低泄漏事故的风险，储罐区域应规划安全区，确保在事故发生时，疏散人员能够迅速找到通往安全区域的路径。安全区的设置需要综合考虑气体扩散、爆炸可能性、火灾蔓延等因素，并确保有效的交通通道和应急响应措施。图 2 为某石化公司厂区事故疏散示意图。

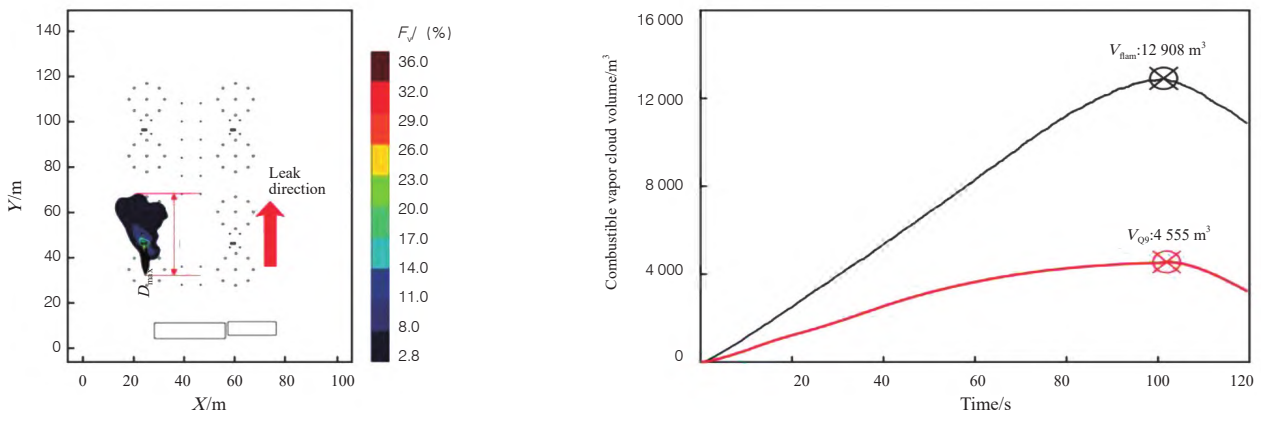
2.2 环境影响

液化石油气本身不含有毒物质，但其成分中的一些轻烃类气体，如乙烷、丙烷、丁烷等，属于温室气体，它们的泄漏会对大气造成污染，并会导致局部的空气质量下降。如果泄漏的液化石油气大量扩散到大气中，会增加温室气体的排放，助长全球气候变化。虽然液化石油气的温室效应较低，但如果泄漏量很大，仍然会对气候造成不小影响。液化石油气本身无色无味，为了便于泄漏的气体被感知，通常会添加臭味剂，泄漏后空气中的异味可能对周围居民和工作人员的健康造成不适，导致头痛、呕吐、呼吸困难等症状。

液化石油气虽然主要以气体形式存在，但在某些情况下，液体泄漏也会对周围环境造成污染。如果液化石油气储罐的泄漏量很大，液态气体会渗入地下，污染土壤和地下水。尽管液化石油气在土壤中容易挥发，但泄漏的早期阶段仍会造成土壤的污染，尤其是在渗透性强的土壤中。液化石油气若泄漏至水体中，由于其低溶解度，会在水面形成气泡层或油膜，造成水域的污染，这种污染会影响水生生物的生存环境，甚至影响饮用水源。

2.3 经济损失

液化石油气储罐泄漏事故会造成重大财产损失，包括储罐本身、管道、



a）*X-Y* section of gas cloud concentration and D_{max}

b）Combustible gas cloud volume represented by V_{flam} and V_{Q9}

图 1 液化石油气泄漏诱发蒸气云爆炸的数值模拟

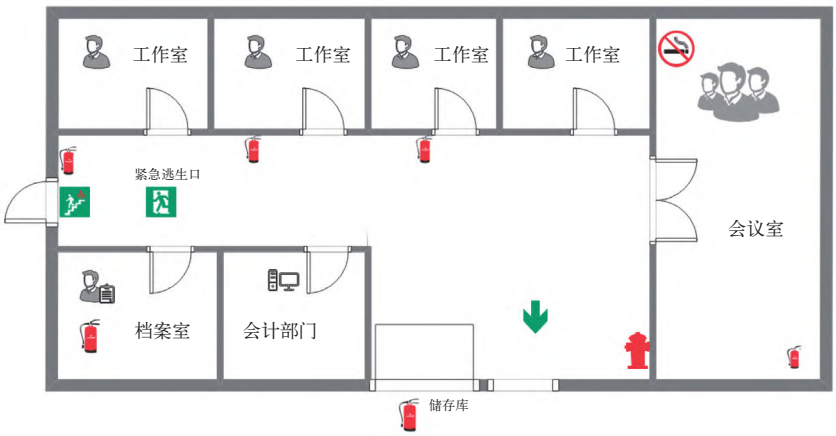


图 2　某化工厂区事故疏散示意图

设备以及其他相关设施的损毁。储罐发生泄漏后，爆炸或火灾会摧毁储罐及周围设备，导致直接财产损失，此外，发生严重火灾时，相关建筑物、交通设施和工业设备也会被烧毁或损坏。液化石油气储罐的泄漏会导致工厂或生产设施停工，造成经济损失，停工时间越长，企业的生产和销售能力受到的影响也越大，直接导致收益减少。泄漏事故后，清理泄漏气体、修复损坏设施、恢复生产等方面需要巨额的资金支持。事故发生后，还需要对污染的土壤和水体进行治理，进一步增加企业的经济负担。

企业在储罐泄漏事故中需要承担员工伤亡、财产损失的赔偿责任。特别是如果泄漏事故是由于企业管理不善、设备老化或操作失误等原因引起的，企业需要支付高额的赔偿费用。如果液化石油气泄漏导致了环境污染，企业还会面临生态环境部门的处罚及环境恢复费用，包括对污染水体、空气以及受污染的土壤进行修复的费用。事故发生后，需要赔偿受害方的人身伤害、财产损失和精神损害等，企业会有直接的经济压力，还会损害其声誉。

3　液化石油气储罐泄漏风险的防控措施

3.1　设计与技术控制

3.1.1　储罐选址与隔离设计

储罐选址是液化石油气储罐安全的基础，选址不当会导致在泄漏或爆炸发生时，周围环境的破坏和损害扩大。储罐应选择远离居民区、学校、医院等公共场所的位置，以避免泄漏事故发生时对人员的威胁。储罐应与其他设施如工厂、仓库、住宅等保持适当的安全距离，通常遵循国家或地方的安全规范，确保泄漏、火灾或爆炸等事件不会扩展至周围区域。在储罐与其他建筑物之间，应设置防火隔离墙或防火带，能够在火灾发生时有效隔离火源，防止火灾蔓延。在储罐及其周围设置明显的危险区域标识，确保工作人员或周围人员远离可能发生爆炸的区域。储罐选址与隔离设计的标准距离表见表 2。

3.1.2　先进的泄漏检测与报警系统

先进的泄漏检测系统可以实时监测液化石油气储罐的安全状态，及时发现泄漏并发出警报。如图 3 所示，安装于储罐周围的气体传感器能够监测气体浓度的变化，尤其是液化石油气的挥发成分，一旦检测到气体浓度超过安全阈值，系统会发出报警信号。光纤传感器能够检测到储罐表面或管道的温度变化，能有效监测可能的泄漏源，光纤传感器在实时监控、早期报警等方面具有高灵敏度和精确度。红外摄像头能够通过监测温度变化或气体泄漏的热辐射特征，检测到泄漏源，该技术具有非接触性，适用于难以直接接近的地方。

报警系统能在泄漏发生时及时通知工作人员并采取应急措施。当泄漏事件发生时，声光报警器能够发出响亮的声音和强烈的闪光，确保工作人员及时发现并采取行动。报警系统与泄漏检测系统联动，一旦检测到泄漏，自动控制系统会起动阀门关闭、报警器发出警报、起动风扇通风等安全措施。报警系统通过与远程控制系统相连，报警信号可以传输至监控中心，工作人员能够实时监控储罐状态，并根据需要调动应急资源。

3.1.3　储罐的定期检查与维护

储罐的定期检查是确保其长期安全运行的重要手段。定期检查储罐的外

表 2　储罐选址与隔离设计的标准距离表

储罐容积 /m³	与居民区的最小距离 /m	与工厂建筑的最小距离 /m	与公共场所的最小距离 /m	与交通干道的最小距离 /m
5	15	10	15	10
10	20	15	20	15
25	25	20	25	20
50	30	25	30	25
100	40	30	40	30
250	50	40	50	40
500	70	60	70	60
1000	100	80	100	80

图 3　石油液化气储罐远程报警系统

部结构、焊缝、支撑系统等，确保没有腐蚀、裂纹或其他结构性问题。检查储罐的密封系统，确保阀门、管道等连接部位没有泄漏，对于使用了特定密封技术的储罐，定期更换密封材料也是必要的。对储罐进行压力测试，确保其能在正常工作压力下安全运行，测试过程中要监测储罐是否能承受过高或过低的压力。储罐及其附属设备会受到环境中的湿气、盐雾等影响，导致腐蚀，定期对储罐表面进行防腐处理，防止腐蚀引发泄漏。检查过程中发现存在老化、损坏的设备应及时更换，防止因设备故障引发安全问题。储罐内部应定期清洗，去除杂质和沉积物，确保气体储存环境的清洁和安全。

3.1.4　应急灭火与防爆技术

在液化石油气储罐发生泄漏并引发火灾时，应急灭火技术具有重要作用。泡沫灭火系统能够有效覆盖火源表面，隔绝氧气，抑制火灾蔓延，液化石油气火灾通常需要使用泡沫灭火剂，而非传统的水基灭火。干粉灭火系统能够快速扑灭火源，尤其适用于液化石油气的火灾，具有较高的灭火效率。虽然液化石油气火灾不宜直接用水扑灭，但自动喷水系统可以用于冷却储罐及周围环境，降低火灾蔓延的速度。

储罐的防爆设计能够有效防止火灾、爆炸等意外事件的发生。储罐的阀门、管道和相关设备需配备防爆设计，确保在高压或温度变化的情况下，不会引发爆炸。储罐周围的隔离区设计可以有效限制火源和爆炸的蔓延范围，保护周围设施免受影响。安装爆炸压力释放装置，可以在爆炸发生时自动释放内部压力，减轻储罐破裂带来的危害。

3.2　安全操作规程与培训

储罐的安全设计要求包括储罐的容积、材料选择、密封设计、阀门以及管道系统的设计等，以确保其抗压、抗腐蚀和抗泄漏能力。要明确储罐充装、排放、监测等操作的步骤和规范，确保操作人员按标准操作，避免人为错误导致的风险。在储罐泄漏的情况下，操作规程应明确泄漏的检查、报告、隔离以及灭火措施，确保在发现问题时能够快速响应。规范储罐的日常检查、维护、检修周期和内容，避免因设施老化或设备故障引起的事故。

定期对员工进行安全培训，让员工了解液化石油气的危险特性、储罐泄漏的潜在风险以及应急处理知识，增强其安全防范意识。确保操作人员掌握液化石油气储罐的正确操作方法和故障排查技巧，培训应涵盖各类设备的使用、储罐充装及排放流程、泄漏检查与处理等方面。培养应急处理能力，加强员工在紧急情况下的应变能力，包括火灾爆炸的应急响应、泄漏的快速控制和人员疏散等。定期开展复训和考核，确保员工始终保持较高的安全操作水平。

4　结语

综上所述，本文通过对液化石油气储罐泄漏风险的综合分析，提出了完整的风险评估框架，结合定性和定量方法，全面评估储罐泄漏的潜在风险与后果。通过加强储罐的选址与隔离设计，采用先进的泄漏检测与报警系统，定期进行设备检查与维护，并提升应急响应能力。同时，强化安全管理体系、落实安全操作规程与培训，对于确保液化石油气储罐的安全运行至关重要。

参考文献：

[1] 王辉 . 液化石油气输运管道泄漏扩散及其危险性研究 [D]. 天津 : 河北工业大学 , 2022.

[2] 孙嘉远 . 某 60 万吨液化石油气储配库泄漏风险评价及预警系统的开发 [D]. 大庆 : 东北石油大学 , 2021.

[3] 方文皓 . 液化石油气储罐风险分析、辨识与危险性评估的研究 [D]. 合肥 : 安徽建筑大学 , 2021.

[4] 万卓 . 液化石油气储罐区消防监管分析 [J]. 化工管理 , 2021(05):105-106.

[5] 白永强 . 液化石油气罐区常见隐患 [J]. 劳动保护 , 2020(08):56-57.