

LNG 泄漏事故后果模拟与定量风险评估 \*

陈国华 成松柏  
(华南理工大学安全工程研究所)

陈国华等 .LNG 泄漏事故后果模拟与定量风险评估 .天然气工业 ,2007 ,27 (6) :133-135 .

**摘 要** 在详细分析了 LNG 的危险特性后全面系统地总结了 LNG 低温储罐的潜在火灾、爆炸主要危险事件;并在此基础上,应用挪威 DNV 公司的 SAFETI 定量风险评价软件对某 LNG 站低温储罐泄漏导致的各主要事故类型(喷射火、闪火、沸腾液体扩展蒸气爆炸和蒸气云爆炸等)进行了详细的后果模拟与定量风险评估,通过构建科学的、针对性强的事故模型,对各类事故后果及其风险水平进行了模拟计算,取得了较真实反映事故危害特性的计算机图表、报告等评价结果,对采取有效措施提高我国 LNG 的安全管理水平及降低事故风险具有重要的工程应用价值。

**关键词** 液化天然气 泄漏 事故 模拟 定量 风险分析

一、LNG 危险特性及泄漏事故类型

LNG 是在常压(或略高于常压)下低温(−162℃)液化了的天然气,体积约为其气态体积的 1/620<sup>[1]</sup>。主要组分为甲烷(一般情况下至少 90%),同时含有乙烷、丙烷、氮气及其他天然气中通常含有的物质<sup>[1]</sup>。其主要危险性在于其易燃易爆特性<sup>[2]</sup>,此外,LNG 还具有沸腾与翻滚、低温冻伤、低温麻醉、窒息、冷爆炸等危险<sup>[2]</sup>。

我国已建成的 LNG 站规模不一,用户有民用和工业用户,几乎都是采用日本式工艺流程<sup>[3]</sup>。文献[3]介绍的 LNG 站主要设备包括运输槽车、低温储罐、室温式气化器、蒸发气体(Boil Off Gas,BOG)储罐等,低温储罐是主体设备。对低温储罐 LNG 泄漏引起火灾爆炸发生的不同事故情形可以进行定性分析,结果见图 1 所示。

二、DNV 定量风险评价软件简介

DNV 定量风险评价软件由挪威 DNV 公司独立开发,目前已在全世界得到广泛应用。DNV 系列软件主要包括 SAFETI 和 LEAK 软件。其中 LEAK 软件主要用于计算各种石油化工装置事故发生的频率<sup>[4]</sup>,其数据库基础是全世界范围内石油化工装置的事故数据,因而具有较高的权威性;而 SAFETI 软件则是用于定量风险分析和危险性评价的计算软件<sup>[4]</sup>,凭借其强大的事故模型和统计数据库,能根据用户输入的参数对石油化工装置可能发生的火灾和爆炸事故的影响范围及程度进行计算,并生成相应的图形文件,进而在已知人口和火源分布的情况下计算出事故的个人风险和社会风险值。

三、LNG 储罐泄漏事故定量风险评估实例

1.项目概况

某燃气公司 LNG 站位于某市开发区,距市中心约 5 km。该站分区布置,即甲类生产区(包括 4 台容积 100 m<sup>3</sup>、最大工作压力 0.8 MPa 的低温储罐、LNG 卸车、气化区和调压计量区),生产辅助区(消防水泵、消防水池、变配电室和办公用房等)。其中储罐最大储存量不得超过储罐体积的 95%。

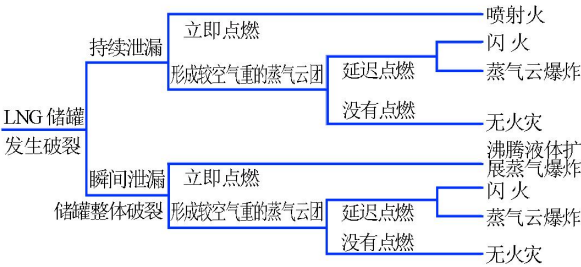


图 1 低温储罐 LNG 泄漏主要事故类型分析图

\* 本文受到广东省安全生产监督管理局安全生产专项资金项目(编号:粤安监[2006]770 号项目计划 B 类第一项)资助。

**作者简介:** 陈国华,教授,博士生导师;地址:(510640)广东省广州市华南理工大学安全工程研究所。电话:(020) 87114740。E-mail:mmghchen@scut.edu.cn

该站 LNG 组分为甲烷、乙烷、丙烷、氮气等,甲烷约占 91.46% (体积分数),密度为  $456\text{ kg/m}^3$ ,故该站 LNG 贮存量为  $456 \times 100 \times 4 \times 0.95/1000 = 173.28\text{ t}$ ,而根据 GB18218-2000《重大危险源辨识》,贮存区 LNG 的临界量为 10 t,故该储罐站属于重大危险源。为简化评价过程,以甲烷作为评价因子。

2.主要事故场景构建及参数输入

应用中主要事故场景及计算所需主要参数输入情况见表 1 所示,其中各类泄漏事件的发生频率是参照 DNV 专家系统对 LPG 泄漏事故统计结果而设定,而泄漏速率为一中间结果,是运行 SAFETI 软件模拟计算后从其水晶报告 (Crystal Reports™) 中提取所得。

表 1 典型事故场景构建及参数输入表

| 泄漏形式 | 泄漏孔径   | 工作条件                | 储量       | 泄漏速率         | 泄漏频率                   | 天气状况                                       | 人口分布                                             | 火源情况                                             | 潜在危险形态              |
|------|--------|---------------------|----------|--------------|------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------|
| 持续泄漏 | 100 mm | -162.3 ℃<br>0.8 MPa | 43320 kg | 122.766 kg/s | $6 \times 10^{-5}$ 次/a | 大气稳定度 (级):D<br>风速:<br>日间 1 m/s<br>夜间 3 m/s | 日间:居民区 2 万人,工业商贸区 9 万人<br>夜间:居民区 4 万人,工业商贸区 1 万人 | 交通密度:<br>日间 200 车次/h; 夜间 80 车次/h;<br>平均时速 65 m/s | 喷射火, 闪火,蒸气云爆炸       |
|      | 200 mm | -162.3 ℃<br>0.8 MPa | 43320 kg | 491.064 kg/s | $8 \times 10^{-6}$ 次/a |                                            |                                                  |                                                  | 喷射火, 闪火,蒸气云爆炸       |
| 瞬间泄漏 | 整体破裂   | -162.3 ℃<br>0.8 MPa | 43320 kg | 瞬间           | $3 \times 10^{-6}$ 次/a |                                            |                                                  |                                                  | 闪火,蒸气云爆炸,沸腾液体扩展蒸气爆炸 |

3.SAFETI 软件进行泄漏后果模拟评价

(1)喷射火危害定量评价

LNG 泄漏后在出口处被立即点燃会形成喷射火 (jet fire),其危害性较小,主要危害是火焰范围及热辐射。危害结果如表 2 所示。

表 2 喷射火危害后果定量分析表

| 泄漏形式        | 水平射流火焰长度 (m)   |                | 热辐射强度 (入射通量为 $12.5\text{ kW/m}^2$ 时的受热目标距离) (m) |                |
|-------------|----------------|----------------|-------------------------------------------------|----------------|
|             | 日间:风速<br>1 m/s | 夜间:风速<br>3 m/s | 日间:风速<br>1 m/s                                  | 夜间:风速<br>3 m/s |
| 100 mm 孔径泄漏 | 145.49         | 124.18         | 291.605                                         | 244.848        |
| 200 mm 孔径泄漏 | 265.81         | 228.50         | 530.888                                         | 447.672        |

(2)闪火危害定量评价

闪火 (flash fire) 是泄漏后的可燃气体在扩散过程中,遇点火源在无约束空间产生的无爆炸性燃烧,其危害主要是热辐射。危害后果如表 3 所示。

(3)沸腾液体扩展蒸气爆炸危害定量评价

沸腾液体扩展蒸气爆炸 (BLEVE) 的主要危害是热辐射和爆炸产生的冲击波。表 4 为从水晶报告中提取的因罐体破裂而引起的火球热辐射危害与爆炸冲击波超压危害结果。另外可知由罐体破裂引起的火球半径为 400.79 m,火球持续时间为 15.40 s。

(4)蒸气云爆炸危害定量评价

蒸气云爆炸 (VCE) 主要危害是爆炸引起的冲击

表 3 闪火产生的热辐射影响表

| 泄漏形式        | 扩散到最远端的<br>可燃气体云浓度<br>(ppm) | 泄漏点下风向的影响<br>距离 (m) |                |
|-------------|-----------------------------|---------------------|----------------|
|             |                             | 日间:风速<br>1 m/s      | 夜间:风速<br>3 m/s |
| 100 mm 孔径泄漏 | 22000                       | 710.918             | 467.347        |
|             | 44000                       | 422.249             | 347.722        |
| 200 mm 孔径泄漏 | 22000                       | 1238.24             | 856.733        |
|             | 44000                       | 711.543             | 631.1          |
| 瞬间泄漏        | 22000                       | 516.885             | 739.798        |
|             | 44000                       | 290.127             | 380.531        |

表 4 BLEVE 危害定量分析结果表

| 入射通量为 $15.172\text{ kW/m}^2$ 时的受热目标距离 (m) | 摧毁房屋,人员死亡半径 (m) (超压 = $0.020685\text{ MPa}$ ) | 房屋重度破坏,人员重伤半径 (m) (超压 = $0.01379\text{ MPa}$ ) | 房屋轻度破坏,人员轻伤半径 (m) (超压 = $0.002068\text{ MPa}$ ) |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 400.79                                    | 182.006                                       | 236.453                                        | 932.826                                         |

波,本评价中采用多能独立模型进行泄漏后果模拟评价,为便于计算取延迟点火时间分别为 1 min 和 5 min,爆源强度取 7 级,评价结果汇总如表 5 所示。

4.SAFETI 软件进行定量风险评估

(1)风险评价标准的选定

风险包括个人风险和社会风险<sup>[5]</sup>。个人风险常用风险等值线图表征,社会风险则用“累积频率/死亡人数曲线 (F/N 曲线)”表征<sup>[5]</sup>。本项目中个人风险标准上下限分别取  $10^{-5}$  次/a 和  $10^{-7}$  次/a,而社会风险标准分别取  $10^{-3}$  次/a 和  $10^{-5}$  次/a。

表 5 VCE 爆炸后果定量分析表

| 泄漏形式                              | 100 mm 孔径泄漏 |         | 200 mm 孔径泄漏 |         | 瞬间泄漏    |
|-----------------------------------|-------------|---------|-------------|---------|---------|
| 点火时间(min)                         | 1           | 5       | 1           | 5       | 延迟      |
| 泄漏速率(kg/s)                        | 122.766     | 122.766 | 491.064     | 491.064 | 瞬间      |
| 泄漏量(kg)                           | 7365.96     | 36829.8 | 29463.84    | 43320   | 43320   |
| 局部受限强度级别(级)                       | 7           | 7       | 7           | 7       | 7       |
| 局部受限百分数                           | 45          | 45      | 45          | 45      | 45      |
| 摧毁房屋,人员死亡半径(m)(超压=0.020685 MPa)   | 208.376     | 356.325 | 330.782     | 376.128 | 376.128 |
| 房屋重度破坏,人员重伤半径(m)(超压=0.01379 MPa)  | 276.006     | 471.968 | 438.136     | 498.207 | 498.207 |
| 房屋轻度破坏,人员轻伤半径(m)(超压=0.002068 MPa) | 1351.16     | 2310.44 | 2144.83     | 2438.89 | 2438.89 |

(2)应用项目的定量风险分析

本评价中选取了两个风险评价点进行考察,见图 2、3。由图 2 知,评价点 2 的夜间个人风险水平低于风险下限,其风险程度可忽略。

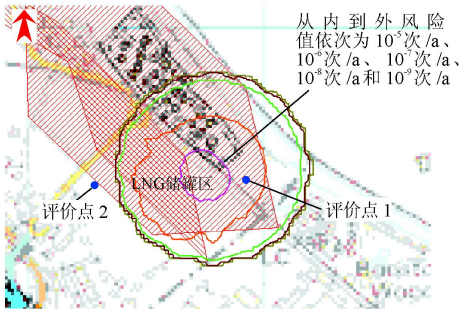


图 2 夜间 LNG 泄漏个人风险等值线图

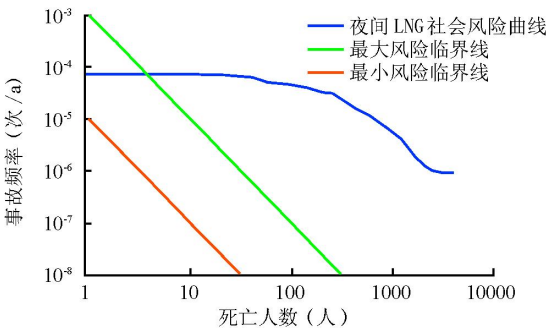


图 3 夜间 LNG 泄漏社会风险  $F/N$  曲线图

此外,通过进一步提取评价结果水晶报告、个人风险等值线图以及社会风险  $F/N$  曲线图可得风险点 1 和风险点 2 的个人风险值和社会风险值。表 6 为风险点 1 的个人风险和社会风险水平汇总表。由

表 6 风险点 1 定量风险评价结果表

|    | 个人风险值(次/a)          | 社会风险值(次/a)          |
|----|---------------------|---------------------|
| 日间 | $4.27\times10^{-6}$ | $4.57\times10^{-2}$ |
| 夜间 | $7.80\times10^{-6}$ | $2.65\times10^{-2}$ |

表 6 可知,风险点 1 的个人风险处于上、下限之间的“灰色区域”,而社会风险位于上限值以上,故一定要采取有效措施降低风险程度。

四、结 论

(1)DNV 软件能很好地对石油、化工等装置中各种事故进行定量风险模拟与评估,并能将评价结果以图表的形式直观形象地表达出来。但是要合理正确地使用该软件须结合工程实际,对模拟过程中每一参数都要加以推敲,以确保每一输入项的合理性,从而使模型能更准确地反映工程事故实际。

(2)笔者在对 LNG 危险特性进行分析的基础上,总结了 LNG 站低温储罐泄漏导致的喷射火、闪火、蒸气云爆炸、BLEVE 等主要危险事件类型,并应用挪威 DNV 公司的 SAFETI 定量风险评价软件对某 LNG 低温储罐泄漏导致的各种后果与风险进行了定量分析与评估。

(3)从评价结果可以看出,LNG 站低温储罐泄漏导致的个人风险值和社会风险值都较高,必须采取有效措施,提高企业的安全生产管理水平。

参 考 文 献

[1] 廖志敏,杜晓春,陈刚,等.LNG 的研究和应用[J].天然气与石油,2005,23(3):28-31.

[2] 刘芳文,韩保新,颜文.城市天然气工程环境风险评价[J].安全与环境学报,2006,6(5):91-95.

[3] 刘新领.论 LNG 站的安全技术管理[J].城市燃气,2005,363(5):12-15.

[4] 梁韬,陈国华.SAFETI 在 LPG 储罐事故后果评价中的应用[J].油气储运,2006,25(2):53-58.

[5] 武雪芳,陈家宜.定量风险评价标准探讨[J].上海环境科学,2000,19(4):152-158.

(修改回稿日期 2007-04-30 编辑 赵 勤)