

液化天然气泄漏的事故树分析

杨帆^{1,2}, 陈保东², 姜文全²

1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东东营 257061

2. 辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁抚顺 113001

摘要 液化天然气(LNG)作为当今世界增长最快的清洁能源,在中国得到越来越广泛的应用,但在储存过程中,一旦发生泄漏将会导致重大事故。为保证清洁能源的生产和应用,LNG 泄漏后的模型和扩散后的危害研究已得到广泛的关注。事故树分析是一种表示与导致灾害事故有关的各种因素因果关系和逻辑关系的分析法,具有直观、全面、有效等优点。目前利用事故树分析法对 LNG 的泄漏还缺乏系统性研究。本文采用最小割集法对引起 LNG 泄漏的因素进行系统分析,定量确定了影响因素的顺序,结果表明,罐体和管路的失效以及人为因素是导致 LNG 泄露的主要因素。从此入手加强防范,必能提高 LNG 安全工作的水平,必能确保其储存的安全性、运行可靠性以及安全对策的准确性提供了可靠的理论依据。

关键词 清洁能源;储存泄漏;事故树分析;安全对策

中图分类号 TE88

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.17.005

Fault Tree Analysis on Liquid Natural Gas Leakage

YANG Fan^{1,2}, CHEN Baodong², JIANG Wenquan²

1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China

2. College of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, Liaoning Province, China

Abstract Liquid Natural Gas (LNG) is the clean energy which is the fastest growing energy in the world and is increasingly used in China. LNG leakage would induce to a nasty accident during its storage. To assure the production and application of the clean energy, the studies on the LNG leakage are of great importance. The leakage model and the damage after LNG disperses have been widely researched. Fault Tree Analysis (FTA) is a method with causal and logical relation indicating all kinds of factors causing danger. It has advantages of intuition, comprehension, and efficiency, etc. Systematical studies on LNG leakage using FTA are short up to now. Based on FTA, the factors causing LNG leakage were systematically analyzed. The order of factors influencing LNG leakage accidents was quantitatively determined. It indicates that the tank, the pipeline and man-made factors are the mainly reasons for the leakage. In order to prevent the above mentioned phenomena, the reliable theory evidence involving accuracy of safety countermeasures is provided for improving the level of safety operation, ensuring the safety of LNG storage and the reliability of operation.

Keywords clean energy; leakage during storage; FTA; safety countermeasures

0 引言

液化天然气(LNG)作为一种优质、高效的清洁能源,对改善能源结构,缓解煤炭运输压力,减少污染物排放,改善大气环境具有重要作用。继广东 LNG 项目之后,国内掀起了三大

石油公司拼抢 LNG 项目的热潮。LNG 是以甲烷为主的液态混合物,具有低温、易挥发、易燃、易爆等特性,一般采用高压储运,一旦发生泄漏,会产生明显的白色蒸气云,并发生火灾及爆炸、低温灼伤、冷冻、令人窒息、冷爆炸等巨大危害^[1-3]。目

收稿日期: 2011-03-15;修回日期: 2011-05-27

基金项目: 辽宁省教育厅重点实验室项目(1S2010097)

作者简介: 杨帆,讲师,研究方向为 LNG 储存输送;电子信箱: yangfanfan0902@126.com;陈保东(通信作者),教授,研究方向为 LNG 储运及利用,电子信箱: baodong24088@yahoo.com.cn

前,LNG 泄漏事故时有发生,对 LNG 泄漏后扩散模型的研究已经开展^[3-4],但确定导致 LNG 泄漏主要因素的重要度系数,对泄漏事故防患于未然是清洁能源安全储运的重点,因此,以 LNG 安全角度的泄漏因素研究势在必行。

本文确定了导致 LNG 泄漏主要因素的重要度系数,采用事故树分析的方法确定影响 LNG 泄漏的因素次序,结果表明,泄漏事件主要是由于设备失效和误操作所导致的。本文共建立了 5 个主要的内部事件,如储罐过度充装、储罐超高压、储罐低压导致的向内破裂、LNG 相关管线的失效以及储罐完整性的缺失等,这些内部事件与外部事件(如地震、破坏、导弹袭击等外部因素)不同,都是可以通过采取恰当的措施避免事故发生。

1 事故树的基本理论

事故树分析是一种表示与导致灾害事故有关的各种因素因果关系和逻辑关系的分析法,具有直观、全面、有效等优点^[5]。它诞生于 20 世纪 60 年代初期,是现代安全系统工程学的重要组成部分,近些年来被广泛应用于储运过程中^[6]。

事故树是从上到下逐级建树并且根据事件而联系,主要包括顶事件、中间事件和基本事件。所谓顶事件就是系统不希望发生的事件,也就是要研究的事件,通常选择系统最不希望出现的事故为顶事件,它位于事故树的顶端,可形象地理解为“树根”;中间事件又称故障事件,它位于顶事件和基本事件之间,并紧跟一个逻辑门表示,可形象地理解为“树枝”;基本事件(底事件)位于树的底部,可理解为“树叶”。

事故树分析的一般程序如下(图 1):熟悉系统,调查事故,确定顶事件,确定目标,调查原因事件,绘制事故树,定性分析,计算上事件发生概率,分析比较,定量分析。

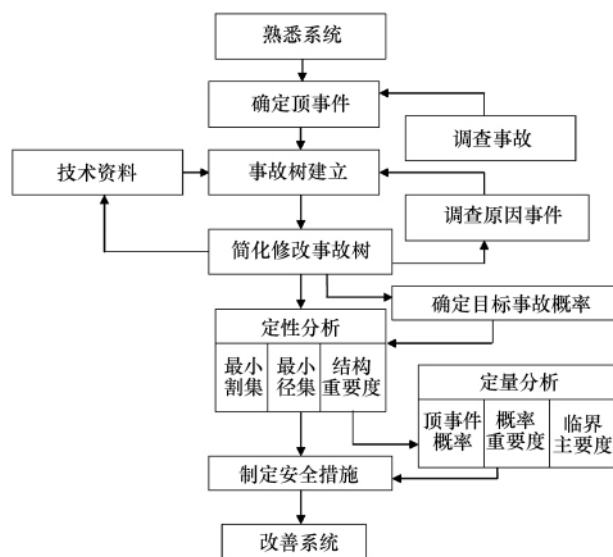


图 1 事故树分析的一般程序

Fig. 1 Common procedures of fault tree analysis

2 LNG 事故树的建立与分析

LNG 泄漏是 LNG 储运安全性的一个重要方面^[7],因此确定 LNG 泄漏为顶事件,建立适用于 LNG 储罐泄漏的事故树如图 2 所示。

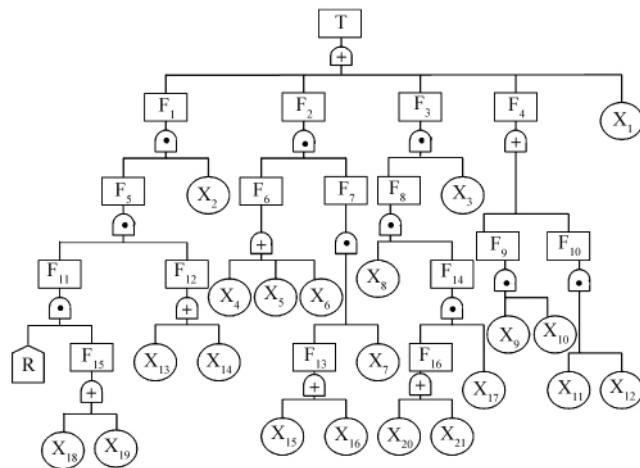


图 2 LNG 泄漏事故树

Fig. 2 Fault tree of LNG leakage

图中,T 为 LNG 储罐及相关管线泄漏;F₁ 为由于过度充装导致 LNG 泄漏;F₂ 为由于超过许用压力导致 LNG 泄漏;F₃ 为由于低于许用真空压力导致 LNG 泄漏;F₄ 为由于相关管线失效导致 LNG 泄漏;F₅ 为罐内达到高液位;F₆ 为罐内达到安全压力;F₇ 为高压保护未能启动;F₈ 为罐内达到真空补充压力;F₉ 为 LNG 储罐进口管线泄漏;F₁₀ 为 LNG 储罐出口管线泄漏;F₁₁ 为充装操作中储罐液位升高;F₁₂ 为操作人员未能对高压正确判断;F₁₃ 为操作人员对高压报警无反应;F₁₄ 为储罐达到气体补充压力;F₁₅ 为操作人员对升高的液位无反应;F₁₆ 为操作人员对低压无反应;X₁ 为 LNG 储罐机械完整性缺失所导致泄漏;X₂ 为系统卸液管线未能启动;X₃ 为真空减压系统未能启动;X₄ 为大气压力突降导致的罐体压差增大;X₅ 为翻滚导致的罐压升高;X₆ 为减压阀未能启动;X₇ 为压力达到安全压力时安全阀未能启动;X₈ 为系统补气系统未能启动;X₉ 为排气系统未能启动;X₁₀ 为进口管线排气阀未能启动;X₁₁ 为管线安全泵未能泄液;X₁₂ 为管线出口排气阀未能启动;X₁₃ 为高压控制阀未能启动;X₁₄ 为操作人员对高压报警无反应;X₁₅ 为高压报警系统未能启动;X₁₆ 为操作人员对储罐高压无反应;X₁₇ 为储罐压力达到低压;X₁₈ 为液位检测仪失效;X₁₉ 为操作人员读取液位检测仪出错;X₂₀ 为低压控制阀未能启动;X₂₁ 为操作人员对储罐低压无反应;R 为储罐充装,“•”为与门,“+”为或门。

(1) 定性分析

如果事故树中的全部底事件都发生,则顶上事件必然发生。但是,大多数情况下并不是一定要所有的底事件都发生,顶上事件才能发生,而是只要某些底事件一起发生就可以导致顶上事件的发生。这些由于同时发生就能够导致顶上事件

发生的底事件集合称为割集。割集中的底事件之间是逻辑“与”的关系。

影响顶事件的最小割集为: $X_1, X_9X_{10}, X_{11}X_{12}, X_2X_{13}X_{18}, X_2X_{13}X_{19}, X_2X_{14}X_{18}, X_2X_{14}X_{19}, X_4X_7X_{15}, X_4X_7X_{16}, X_5X_7X_{15}, X_5X_7X_{16}, X_6X_7X_{15}, X_6X_7X_{16}, X_3X_8X_{17}X_{20}$ 和 $X_3X_8X_{17}X_{21}$ 。其中,1 个 1 阶最小割集、2 个 2 阶最小割集、10 个 3 阶最小割集和 2 个 4 阶最小割集,共 15 个最小割集。由割集理论可知,割集的阶数越小,其发生的可能性越大,对顶事件的影响越大,是系统的薄弱环节。

(2) 定量分析

结构重要度系数是从事故树结构入手分析各基本事件的重要程度,排出各底事件的结构重要度顺序^[8],可以从结构上了解各底事件对顶上事件的发生影响程度,以便按顺序安排防护措施,加强控制。

底事件的结构重要度计算的近似公式为

$$I_{\phi(X_i)} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \frac{1}{n_j} (j \in k_j) \quad (1)$$

其中, $I_{\phi(X_i)}$ 为第 i 个基本事件的结构重要度; k_j 为第 j 个最小割集; n_j 为第 k_j 个最小割集的基本事件数。

由此可得出各基本事件的结构重要度系数分别为:

$$I_{\phi(X_1)}=0.0667$$

$$I_{\phi(X_2)}=0.0889$$

$$I_{\phi(X_3)}=I_{\phi(X_4)}=I_{\phi(X_7)}=0.0333$$

$$I_{\phi(X_5)}=I_{\phi(X_6)}=I_{\phi(X_8)}=I_{\phi(X_{11})}=I_{\phi(X_{12})}=I_{\phi(X_{18})}=I_{\phi(X_{19})}=0.0444$$

$$I_{\phi(X_9)}=0.1333$$

$$I_{\phi(X_{10})}=I_{\phi(X_{13})}=I_{\phi(X_{14})}=I_{\phi(X_{20})}=0.0667$$

$$I_{\phi(X_{16})}=I_{\phi(X_{17})}=0.0667$$

$$I_{\phi(X_{21})}=I_{\phi(X_{22})}=0.0333$$

结构重要度系数顺序为:

$$I_{\phi(X_1)} > I_{\phi(X_2)} > I_{\phi(X_9)} = I_{\phi(X_{10})} = I_{\phi(X_{13})} = I_{\phi(X_{14})} = I_{\phi(X_{20})} = I_{\phi(X_{21})} = I_{\phi(X_{22})} > I_{\phi(X_3)} = I_{\phi(X_4)} = I_{\phi(X_7)} = I_{\phi(X_8)} = I_{\phi(X_{11})} = I_{\phi(X_{12})} = I_{\phi(X_{18})} = I_{\phi(X_{19})} = I_{\phi(X_5)} = I_{\phi(X_6)} = I_{\phi(X_{16})} = I_{\phi(X_{17})} = I_{\phi(X_{18})} = I_{\phi(X_{19})} = I_{\phi(X_{20})} = I_{\phi(X_{21})} = I_{\phi(X_{22})}$$

3 结果分析与安全措施

控制各底事件的发生,特别是预防结构重要度大的底事件的发生,如底事件 X_7 (当压力达到安全压力时安全阀未能启动)的重要度系数最大,大于 X_2 (系统卸液管线未能启动),大于 X_1 (储罐机械完整性缺失所导致)、 X_{15} (高压报警系统未能启动)、 X_{16} (操作人员对储罐高压无反应)等。故应从罐体和管路入手,如:预防“储罐超高压”、“储罐机械完整性缺失”、“安全阀失效”、“卸液管线失效”、“高压报警系统失效”、“误操作”等,从而有效预防 LNG 泄漏事故。

应该采取的安全措施如下。

(1) 加强设备的维护,严格控制 LNG 输入与输出的工艺参数,预防储罐超压。

(2) 加强阀门、法兰、储罐安全附件和罐体完整性、安全性的检查,防止因腐蚀等原因造成罐体失效,预防泄漏。

(3) 正确选择阀门、法兰以及罐体安全附件的型号,保证设备的安全。

(4) 加强人员的安全培训,重视事故中人的因素,因为大多数基本事件都与人的不安全行为有着直接或间接的关系。

4 结论

对泄漏进行事故树分析,是减小 LNG 储运危险性的一项重要措施。由于泄漏造成的火灾、爆炸以及中毒等危险性给实际的管理造成很大困难。

(1) LNG 泄漏分析对保证清洁能源的生产和应用至关重要,事故树分析法具有简明、直观、灵活的特点,是进行工程系统可靠性与安全分析及评价常用的有效方法。

(2) 建立了 LNG 泄漏事故树,该事故树一共考虑了 21 个基本事件,通过对事故树定性分析确定了 LNG 储存运行管理中的薄弱环节。

(3) 采用最小割集分析法、二次近似的计算方法,更加精确地计算出影响因素的重要度大小顺序,确定了引起 LNG 泄漏的主要原因,提出了相应的改进措施,对预防 LNG 泄漏的发生提供切实的理论依据。

参考文献 (References)

- [1] Giribone R, Claude J. Comparative safety assessment of large LNG storage tanks [C]. 11th International Conference on LNG, Birmingham, United Kingdom, July 3-6, 1995.
- [2] Johnson E M, Welker J R. Development of an improved LNG plant failure rate data base [R]. GRI-80/0093. Chicago, IL, USA: Gas Research Institute, 1980.
- [3] 周彦波, 黄俊, 鲁军. 液化天然气泄漏与扩散的安全性分析[J]. 天然气工业, 2007, 27(1): 131-133.
Zhou Yanbo, Huang Jun, Lu Jun. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(1): 131-133.
- [4] 陈国华, 成松柏. LNG 泄漏事故后果模拟与定量风险评估 [J]. 天然气工业, 2007, 27(6): 133-135.
Chen Guohua, Cheng Songbai. *Natural Gas Industry*, 2007, 27 (6): 133-135.
- [5] 徐志胜. 安全系统工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
Xu Zhisheng. *Safety system engineering* [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [6] 蒋宏业, 姚安林, 郑兴华, 等. 天然气球罐失效故障树分析 [J]. 天然气工业, 2003, 23(6): 143-145.
Jiang Hongye, Yao Anlin, Zheng Xinghua, et al. *Natural Gas Industry*, 2003, 23(6): 143-145.
- [7] Kim H, Koh J S, Kim Y, et al. Risk assessment of membrane type LNG storage tanks in Korea-based on fault tree analysis [J]. *Korean J Chem Eng*, 2005, 22(1): 1-8.
- [8] Lee S R. Safety comparison of LNG tank designs with fault tree analysis [C]. 23rd World Gas Conference, Amsterdam, Holland, June 5-9, 2006.

(责任编辑 代丽)