

研究报告

# 液化石油气泄漏的危险性分析及其事故后果评价方法

陈思凝, 孙金华, 王青松

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

**[摘要]** 液化石油气(LPG)在其运输和存储过程中存在着各种与火灾和爆炸相关的危险性。由于LPG的泄漏可能导致包括闪火,不可控蒸气云爆炸,沸腾液体膨胀蒸汽爆炸等一系列灾害的发生,针对上述的各种灾害的具体发生条件及其危险性进行了分析;在事故后果评价中采用量化风险分析,提出了沸腾液体膨胀蒸汽爆炸和不可控蒸气云爆炸对周围人员可能造成危害的评价方法。

**[关键词]** 液化石油气泄漏;火灾;危险性分析;后果评价

**[中图分类号]** X937 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)09-0061-04

## 1 前言

在现代生活和化学工业中,液化石油气(LPG)已经得到广泛的应用,由于液化石油气是将以丙烷为主的石油气通过加高压形成的,在运输和储存过程中具有较大的燃烧与爆炸危险性,相关事故国内外都有多次报道。如在1984年11月9日墨西哥城由于液化石油气泄漏引起火灾,致使2个球形储罐破裂,液化气大量泄漏引发大火,高温火焰包围了附近的容器,相继造成多个储罐破裂爆炸(其中确认的沸腾液体膨胀蒸汽爆炸有4起,并由此引发连锁化学爆炸),死亡人数达500人,伤7000人。此事故据称是世界上最大的工业安全事故<sup>[1]</sup>。

液化气罐体在储存和运输过程中,由于安全阀失效、机械损伤(包括罐体材料缺陷,材料疲劳,腐蚀以及边角、焊缝处的失效与强度降低)、热应力、压应力、操作不当以及池火焰包围或是喷射火炬造成罐体材料强度下降等因素中某些因素的联合作用,可能造成罐体出现不同程度的破裂,在具体的环境下会引发不同形式的灾害。

对LPG存储和运输过程中泄漏事故进行后果

评价研究的主要目的在于评估LPG泄漏事故的危险性;判定各种事故对人体和周围设施的破坏强度和影响范围;提出防止和减轻事故危害的方法;使用成本-收益的方法;在保证降低事故危害至合理范围的前提下,评估降低危害举措的效果。

## 2 LPG泄漏事故危险性分析

在火灾条件下,当罐体表面出现破裂后,在容器内高压的驱动下,液化气以气态、液体或是气液两相流的形式高速喷出。对于泄漏引起的不同的事故情况进行分析,如图1所示。

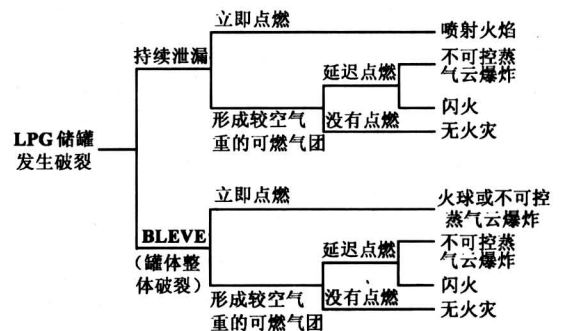


图1 LPG 泄漏的事件后果分析图

Fig.1 The consequence analyze graph of leak of LPG

[收稿日期] 2004-08-13; 修回日期 2004-11-09

[基金项目] 国家重大基础研究资助项目(“九七三”项目)火灾动力演化和防治基础资助项目(2001CB409600)

[作者简介] 陈思凝(1976-),男,安徽马鞍山市人,中国科学技术大学博士研究生

当液化气从储罐中泄漏出后,如果没有立刻点燃,液化气会蒸发成为可燃气体云与空气混合在一起。如果产生的可燃蒸气云团在燃烧极限范围内被点燃,可燃气体云的燃烧火焰传播速度决定了事故类型是闪火(flash fire)还是不可控蒸气云爆炸(UVCE)。闪火是一种非爆炸性的燃烧过程,实验中观测到的火焰速度平均约为10 m/s,这种速度不足以产生爆炸性超压<sup>[2]</sup>。当速度增加导致爆燃向爆轰转变时,就会产生不可控蒸气云爆炸。对于周围的人和设备来说,闪火的主要危害来自热辐射和直接接触火焰,而在不可控蒸气云爆炸中超压引起的危害则更为显著。

气态或是两相流形式的可燃液化气从裂缝中喷出,遇到火源会形成喷射火焰。除非泄漏开口较大(超过20 mm),否则喷射火焰释放热量是有限的,其火焰长度可能不足5 m<sup>[3]</sup>。即便如此,对于火焰喷射方向上没有防火保护的储罐还是会造成强烈的热冲击。通过合理安排储罐群平面布置可以显著降低喷射火焰事故的危害性。

在众多可能的液化气泄漏事故中,最为严重的一种灾害形式是沸腾液体膨胀蒸汽爆炸(BLEVE)。作为一种物理爆炸,BLEVE的起因包括若干因素,其中最为常见的一种是在火灾场景下导致的BLEVE。一个部分装有LPG的储罐,其液位上方暴露于火焰的冲刷下。火焰导致了很高的储罐壁面温度,壁温最高可以达到600~700℃,从而引起储罐材料强度下降。内部的压力导致了灼热的金属表面产生蠕变,壁面逐渐变薄,最终可能导致在罐壁表面产生裂缝。如果裂缝在整个储罐上传播开来,那么即发生了BLEVE。如果裂缝不继续变大,则发生LPG的喷射泄漏。

BLEVE具有极大的破坏性,冲击波和抛射物是其主要的危害。爆炸会产生容器碎片的抛射,直接造成人员和周围设施的损伤,更进一步的是可能使周围设施(连接的管道,支撑架,其他附加装置,邻近的建筑或物体等)飞射,而引发连续事故,扩大破坏性,这种现象一般称为“多米诺效应”。如果介质是有毒的,还要考虑扩散出的有毒物质对事故影响范围内人及其他生物健康的影响。如果介质是可燃的并且立刻被点燃,那么可能产生火球,引发火焰冲击和强烈的热辐射等伤害。如果可燃性介质没有被立刻点燃,那么延迟点燃可能会导致蒸气云爆炸,在某些情况下甚至可能引发相邻

储罐的连锁爆炸。

### 3 储罐LPG泄漏事故后果评价方法

#### 3.1 常用量化风险分析方法概述

量化风险分析(QRA)作为一种风险评价的方法和程序,进行评价的主要步骤如下:

3.1.1 危险辨识 就是要了解什么将会导致危险的出现。危险辨识包括调查所有可能引发事故的潜在因素,还要进一步分析这些因素的出现可能是由哪些具体条件综合导致的。典型的危险辨识技术有检查表、统计分析、危险及操作分析(HAZOP)。在LPG装置中,意外事故的诱因大致可分为内部因素(金属强度下降,错误的装配/维护)和外部因素(撞击,火灾以及在转运过程中的操作不当)。

3.1.2 概率评估 需要了解危险事件发生所依靠的环境和条件及其相互间关系。这样才可以评估一个意外事件发生的概率。在LPG泄漏事故中,可以使用故障树(fault tree)来进行分析,也经常使用到以往事故的统计数据。

3.1.3 结果分析 主要分析评估在事故中泄漏出的危险物质或是能量对于外界的影响。完整的评估结构通常包括 a. 事故来源特征分析——和事故类型紧密相关,要求阐明泄漏的特征(流量,数量,物质物理特性等); b. 事故相关的物理现象辨识——在事故来源特征和外部条件分析(是否存在火源,火源类型,当地气象条件)的基础上,去辨识中间的(扩散)和最终的现象(燃烧和爆炸); c. 损害评价——这一步骤中测定或是使用数学模型计算热辐射、冲击波、抛射物等对人员和财产的伤害。在LPG泄漏中,一般不考虑气体毒性对周围环境的影响。

3.1.4 风险评估 将事故发生的概率和事故后果的严重度两方面结合起来考虑。由此出发,来确定可承受的个体和社会风险。

#### 3.2 典型灾害事故后果评价

当液化气储罐区发生LPG泄漏或是着火事故后,消防队员和相应的警察,医疗等抢救救灾人员到达现场时,他们对于现场的情况如储罐的液位等并不一定很了解,这就可能导致更多的人员伤害。同样的对于事故发生点周围的设备财产和建筑物来说,也需要对其受损范围进行评价。

3.2.1 BLEVE 强烈火球热辐射伤害评价 在LPG储罐泄漏事故造成的火灾场景中,对于抢救

救灾人员来说，最为严重的危害在于 BLEVE 火球引发的强烈热辐射。所以，确立人员的安全工作距离，也往往采用热辐射对人员的伤害数据作为判据，同时综合考虑冲击波和抛射物可能造成的伤害。对此国内外有大量的研究，也提出了各种火球半径模型，按照与火球中的 LPG 质量的比例关系可得出通式

$$R = am^b \quad (1)$$

根据 A. M. Birk 模型<sup>[4]</sup>，对于丙烷 BLEVE 的火球半径有一个近似的关系式

$$R = 3m^{0.33} \quad (2)$$

式中： $m$  丙烷质量 (kg)； $R$  火球半径 (m)。

火球的持续时间为

$$t = 0.15R \quad (3)$$

式中  $t$  的单位为 s。

对于容积为  $1 \text{ m}^3$  的丙烷液化气来说 ( $\rho = 0.531 \text{ g/cm}^3$ )，应用 (2) 式可得其火球半径  $R$  为  $24.3 \text{ m}$ 。

火球表面热辐射通量在文献中各有不同，对于给定辐射热通量的半径为  $R$  的近地面火球，目标安全距离可由式 (4) 估算<sup>[5]</sup>

$$S = R \left[ \frac{Q}{f} \right]^{0.5} \quad (4)$$

式中： $S$  距离火球中心点的距离 (m)， $R$  火球半径 (m)， $Q$  火球表面热通量 ( $\text{kw/m}^2$ )， $f$  目标处热通量 ( $\text{kw/m}^2$ )。

需要指出的是在上述表达中忽略了大气热传递系数  $\tau$ ，它表征随半径增加火球表面辐射在大气传输中显著衰减。

在人体接收到的辐射热通量为  $21 \text{ kw/m}^2$  的条件下，大约经  $2 \text{ s}$  会使皮肤感到疼痛<sup>[6]</sup>，超过这个时间后，持续暴露会造成严重的灼伤。以这个剂量的热通量为伤害标准的话，假设一个 LPG 储罐火灾，其表面热辐射量为  $300 \text{ kw/m}^2$ ，应用公式 (4)，得到  $S = R \left[ \frac{300}{21} \right]^{0.5} = 3.8R$ 。即  $3.8R$  的距离是合适的安全距离。同样的如果热流量为  $6.5 \text{ kw/m}^2$ ，在  $10 \text{ s}$  内裸露的皮肤会感到疼痛， $20 \text{ s}$  的暴露时间就会造成灼伤，从而可以推算出  $7.1R$  为合适的安全距离。

火球的持续时间也是需要着重考虑的，它随具体的泄漏情况而定，参与爆炸的 LPG 质量越多，火球持续时间越长。400 l 丙烷储罐的火球持续时间大约为  $2.4 \text{ s}$ ，这样在  $3.8R$  的距离下，裸露的

皮肤受到的伤害可以大幅降低。如果是  $100 \text{ m}^3$  丙烷引发的 BLEVE，则火球持续时间大约为  $17 \text{ s}$ ，这时对于较近工作距离的救护人员就必须穿上适当的防护服，并在火球发生时紧急撤离。

火球热辐射对附近的设备财产的破坏作用主要有设备表面油漆剥落、设备内部介质温度升高、结构变形甚至着火燃烧等。其中木材受火球热辐射的影响最为明显，在足够强的热辐射下，木材可能被引燃。热强度为热通量与作用时间的乘积，它表示物体单位面积发射或吸收的能量。距离 LPG 储罐距离  $S$  处的热通量  $f$  可由下式计算

$$f = Q \times \tau \times F \quad (5)$$

式中： $Q$  火球表面热通量 ( $\text{kw/m}^2$ )， $\tau$  大气传递系数， $F$  视角系数。引燃木材所需的临界热强度大约为  $1000 \text{ kJ/m}^2$ 。由此可判断  $S$  为何值时木材会引燃，从而得到木材辐射引燃半径。

在具体的火场条件下，对于确立合理的安全距离，很难给出一概而论的指导性数据，还需要根据当时的情况和罐体的规模来确定。在了解到存储的 LPG 的质量后，可以按照图 2 中所示的流程对火球半径、持续时间以及人员安全距离等进行估算。

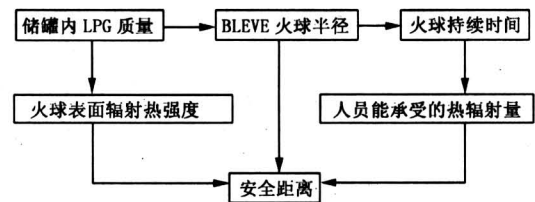


图 2 BLEVE 强烈火球热辐射伤害评价流程简图

Fig.2 The flow chart of the assessment of heat radiation damage by BLEVE

### 3.2.2 BLEVE 灾害中冲击波的损害评价

BLEVE 灾害中冲击波形成的主要原因是蒸汽体积的快速膨胀以及随后蒸气云的爆炸。对于不涉及燃烧条件的冲击波来说，其伤害半径较火球要小得多。在估算丙烷 BLEVE 超压冲击波时，常用的一个方法是将其换算为同等质量的 TNT 来进行计算。由于 BLEVE 过程中的能量泄放较之 TNT 高速爆炸要来的平缓得多，所以采用这种方法，得到的数据对于估算丙烷 BLEVE 造成的冲击效果来说是有充足余量的。 $55 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下， $1 \text{ kg}$  液态丙烷气化时对外界所作功大约为  $63 \text{ kJ/kg}$ ，只有同等质量 TNT 爆炸能量的  $1.3\%$ 。需要注意的是，前面提到的百分数不包括丙烷燃烧所释放的化学能。

对于抛射物的伤害评价, 由于抛射物的运动具有很强的随机性, 国内外大多是通过事故现场实际调查得到的统计数据来进行估算, 难以给出详细的算法。

3.2.3 不可控蒸气云爆炸对人体破坏的评价  
LPG 气化后, 可燃气体与空气混合形成可燃气体云团, 当浓度处于爆炸浓度范围内时, 遇火可能产生不可控蒸气云爆炸, 产生冲击波, 对周围人员设备造成不同程度的损伤和破坏。关于 LPG 蒸气云爆炸的严重度可用 TNT 当量法来估算<sup>[7]</sup>, 蒸气云爆炸 TNT 当量  $W$  的计算式如下:

$$E = \alpha Am Q_f \quad (6)$$

$$W = \frac{E}{Q_{TNT}} \quad (7)$$

式中:  $E$  爆源能量 (kJ/kg);  $\alpha$  地面爆炸系数, 取值 1.8;  $A$  蒸气云的 TNT 当量系数, 取值 0.04;  $m$  蒸汽云中对爆炸冲击波有实际贡献的燃料质量 (k);  $Q_f$  燃料的高值燃烧热 (kJ/kg);  $Q_{TNT}$  TNT 的爆热 (kJ/kg), 取值为  $4.52 \times 10^3$ 。对于在爆炸中人员的伤害评价, 最有意义的是划分出死亡区和重伤区, 评价标准如表 1 所示。

表 1 爆炸导致的人员伤害的评价标准

Table 1 The assess criterion of the human damage at explosion condition

| 区域  | 定义  |
|-----|---|
| 死亡区 | 此区域内人员因冲击波作用导致肺出血死亡概率为 50%                |
| 重伤区 | 此区域内入射超压为 44 kPa 时, 人员因冲击波作用而耳膜破裂的概率为 50% |
| 轻伤区 | 此区域内入射超压为 17 kPa 时, 人员因冲击波作用而耳膜破裂的概率为 1%  |

在距离爆炸危险源  $S_1$  距离内, 人员因冲击波作用导致肺出血死亡概率为 50%, 以  $S_1$  为半径作圆<sup>[8]</sup>, 定义这一区域为死亡区

$$S_1 = 0.907 W^{0.399} \quad (8)$$

当入射超压为 44 kPa 时, 人员因冲击波作用而耳膜破裂的概率为 50%, 此时距爆炸源的距离  $S_2$  被定义为重伤区半径, 冲击波超压可由下式计算得到:

$$\Delta P = (0.137Z^{-3} + 0.119Z^{-2} + 0.269Z^{-1} - 0.019) \times 10^5 \quad (9)$$

式中:  $Z = S_2 \times \left(\frac{P_0}{E}\right)^{\frac{1}{3}}$ ;  $P_0$  环境压力 (Pa);  $\Delta P$  冲击波的入射超压 (Pa)。由式 (9) 进行反推, 从而可得到重伤区半径  $S_2$ 。

## 4 结语

概述了火灾条件下液化石油气泄漏可能引发的事故后果, 并对其危险性进行了分析, 指出在各种事故情况中, 沸腾液体膨胀蒸汽爆炸的破坏性最大。在事故后果评价中采用量化风险分析方法, 给出了由 BLEVE 引起的火球辐射及不可控蒸气云爆炸对人员的伤害范围的计算方法。

需要指出的是, 由于 LPG 泄漏事故复杂性, 随机性和不确定性, 都会导致事故后果评价中采用的数学模型以及模拟计算的结果与实际情况存在一定的偏差, 参数的选择也会影响到评价结果的准确性。在实际工程中还需要结合当时具体的环境和条件以及要求来分析。

### 参考文献

- [1] Pietersen C M. Analysis of the LPG-disaster in Mexico City [J]. Journal of Hazardous Materials, 1988, 20: 85~107
- [2] Center for Chemical Process Safety. Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosion, Flash Fires, and BLEVE [M]. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1984
- [3] Melcher R E, Feutrill W R. Risk assessment of LPG automotive refueling facilities [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 74: 283~290
- [4] Birk A M. Hazards from propane BLEVEs: An update and proposal for emergency responders [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1996, 9 (2): 173~181
- [5] Crawley F E. The effects of the ignition of a major fuel spillage, assessment of major hazards [A]. ICHE Symposium Series No. 71 [C]. Oxford: Pergamon press, 1985
- [6] Baker W E, et al. Explosion Hazards and Evaluation [M]. New York: Elsevier, 1983
- [7] 吴宗之, 高进东, 魏利军. 危险评价方法及其应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001
- [8] 宇德明, 冯长根, 徐志胜, 等. 炸药爆炸事故冲击波、热辐射和房屋倒塌的伤害效应 [J]. 兵工学报, 1998, 19 (1): 33~37 (下转第 69 页)

## The Research and Implementation of WAPI Authentication on WLAN Access Point

Song Yubo, Yang Xiaohui, Hu Aiqun, Wang Zhili

(*Research Center of Information Security, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

[**Abstract**] With the wireless LAN technologies being widely applied, new WLAN security standards have been proposed to enhance the WLAN security. In this paper, through discussing the technology characteristic and the basic framework of the WAPI standard, the detail of the application of the WAPI authentication procedure on the WLAN access point was given. Furthermore, the performance of the authentication procedure was discussed.

[**Key words**] WLAN; WAPI; test analysis

---

(上接第 64 页)

## The Risk Analysis of Liquefied Petroleum Gas Leak and the Consequence Assessment Method

Chen Sining, Sun Jinhua, Wang Qingsong

(*State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

[**Abstract**] The liquefied petroleum gas (LPG) has multifarious risks associated with fire or explosion in the traffic and storage process. The leak of LPG can induce disasters including flash fire, unconfined vapor cloud explosion (UVCE), boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE), etc. In this paper, occurring condition and risk of those disasters are analyzed. Quantified risk analysis (QRA) is used in consequence assessment. The assessment method for the hazards to the environment by UVCE and BLEVE is researched.

[**Key words**] fire; liquefied petroleum gas leak; risk analysis; consequence assessment