

液化烃储罐区泄漏及火灾爆炸危险分析

傅智敏¹, 曹菲菲²

1. 中国人民武装警察部队学院消防工程系, 河北廊坊 065000

2. 中国人民武装警察部队学院研究生队, 河北廊坊 065000

摘要 在系统分析液化烃不同储存方式及泄漏与火灾爆炸危险的基础上, 提出了液化烃储罐常见火灾爆炸事故类型并分析判断流程。研究表明, 全压力式液化烃储罐发生泄漏的概率与全冷冻式液化烃储罐发生泄漏的概率基本相当; 与全压力储存方式相比, 全冷冻方式储存的液化烃泄漏时强烈的吸热作用会造成更为严重的冷冻伤害破坏; 空间爆炸、孔口火灾和池火是液化烃不同储存方式共有的火灾爆炸危险类型, 全压力式液化烃储罐有发生沸腾液体扩展蒸气爆炸并形成火球的危险, 全冷冻式液化烃泄漏后与水接触则有发生热传递类蒸气爆炸的可能。

关键词 液化烃; 全压力式液化烃储罐; 全冷冻式液化烃储罐; 泄漏; 池火灾; 沸腾液体扩展蒸气爆炸

中图分类号 X932, TE88

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.16.009

Leakage and Fire & Explosion Hazards of Liquefied Hydrocarbon in Storage Tanks

FU Zhimin¹, CAO Feifei²

1. Department of Fire Protection Engineering, Chinese Peoples' Armed Police Force Academy, Langfang 065000, Hebei Province, China

2. Team of Graduate Student, Chinese Peoples' Armed Police Force Academy, Langfang 065000, Hebei Province, China

Abstract The hazards of leakage and fire & explosion of liquefied hydrocarbon in storage tanks are related to the high flammability of liquefied hydrocarbon and the storage conditions such as temperature and pressure. The leakage frequency of the pressurized tank of liquefied hydrocarbon is 4.7×10^{-5} per tank per year, in which the catastrophic rupture frequency is 4.7×10^{-7} per tank per year. The order of magnitude of the leakage frequency for the refrigerated tank of liquefied hydrocarbon is almost the same as that of the pressurized tank. And the catastrophic rupture leakage frequency of both the double containment tank and the full containment tank are 1.0×10^{-7} per tank per year. The heat absorption capacity and the freezing damage of liquefied hydrocarbon are related to its physical properties such as the atmospheric boiling point, the latent heat of vaporization, the specific heat capacity, the storage temperature and pressure of liquefied hydrocarbon, and the environment factors. The freezing damage of the refrigerated liquefied hydrocarbon is more serious due to its strong endothermic effect than that of the pressurized liquefied hydrocarbon if the leakage occurs. The vapor cloud explosion, the venting fire and the pool fire are common types of fire & explosion for both the pressurized liquefied hydrocarbon and the refrigerated liquefied hydrocarbon. Compared with the refrigerated liquefied hydrocarbon, the vapor cloud explosion and the venting fire for both gas and liquid phases, and the ground pool fire are easily formed for the pressurized liquefied hydrocarbon. And the boiling liquid expansion vapor explosion with fireball is a typical hazard. For the refrigerated liquefied hydrocarbon, the vapor cloud explosion may occur when the released refrigerated liquefied hydrocarbon enters a confined space such as a sewer system or an underground conduit system. And the venting fire and the pool fire are formed at the gas phase vents and the containment pit. The heat transfer vapor explosion may occur when the leaked refrigerated liquefied hydrocarbon contacts with water.

Keywords liquefied hydrocarbon; pressurized tank; refrigerated tank; leakage; pool fire; boiling liquid expansion vapor explosion

液化天然气 (Liquefied Natural Gas, LNG)、液化石油气 (Liquefied Petroleum Gas, LPG)、液化丙烷、液化乙烯、液化丙

烯、液化丁烯等液化烃是石油化工企业中重要的加工和储存物料^[1], 其储存呈现出规模大型化和方式多样化趋势。以 LNG

收稿日期: 2013-01-03; 修回日期: 2013-03-11

基金项目: 《工业企业防火》国家级精品课程建设项目

作者简介: 傅智敏, 教授, 研究方向为工业企业防火、火灾风险分析技术等, 电子信箱: 15001027503@163.com

为例,目前国际上已建成容积为 $20 \times 10^4 \text{m}^3$ 的大型常压 LNG 储罐。中国在广东、福建等地建成了容积为 $16 \times 10^4 \text{m}^3$ 的 LNG 全防罐,预计到 2020 年,中国沿海地区进口 LNG 规模可达 $6000 \times 10^4 \text{t}^{[2,3]}$ 。由于液化烃具有甲 A 类火灾危险性,是各类储存物品中火灾危险性最高的一类,因而有必要深入系统地研究液化烃储存过程中的泄漏及火灾爆炸危险^[4-17]。本文针对液化烃储存方式的多样性定性分析液化烃储罐区泄漏与火灾爆炸危险的复杂性,提出液化烃储罐常见火灾爆炸事故类型分析判断流程。

1 液化烃储存方式与泄漏及火灾爆炸危险

1.1 液化烃的主要储存方式

不同种类的液化烃具有不同的物理化学性质,而且储存方式的选用也有较大差别。根据储存压力和储存温度的不同,液化烃的储存方式可分为全压力式、全冷冻式和半冷冻式(表 1)。可以看出,不同储存方式的液化烃储罐在结构特点和储存条件等方面有较大差异^[18,19]。由于半冷冻储存方式兼具全压力式和全冷冻式的特点,本文重点讨论全压力储存和全冷冻储存 2 种方式。

表 1 液化烃的常见储存方式及储存条件

Table 1 Typical storage modes for liquefied hydrocarbon

储存方式	储罐结构	物质类型	设计压力/MPa	设计温度/℃
全压力式	球罐	$p_s(50^\circ\text{C}) \leq 0.79 \text{MPa}$ 的 LPG、液化异丁烷	0.79	
	卧式圆筒罐	$0.79 < p_s(50^\circ\text{C}) \leq 1.77 \text{MPa}$ 的 LPG、液化丙烷	1.77	-20~50
		$p_s(50^\circ\text{C}) > 1.77 \text{MPa}$ 的 LPG、液化丙烯	2.16	
全冷冻式	立式圆柱罐	LNG	0.02	-196
半冷冻式	球罐	液化乙烷	1.77	-50
		液化乙烯	1.9~2.2	-30~-40
	立式圆柱罐	LNG	0.75	-196

1.2 液化烃的泄漏及火灾爆炸危险

液化烃本身的物理化学性质、储存方式及储罐结构决定了其特有的泄漏及火灾爆炸危险。

表 2 列出了部分国内外典型液化烃泄漏及火灾爆炸事

故案例^[20-27]。可以看出,泄漏、空间爆炸、孔口火灾、池火、沸腾液体扩展蒸气爆炸(Boiling Liquid Expansion Vapor Explosion, BLEVE)与火球、热传递类蒸气爆炸等是液化烃储存过程中常见的事故类型。

表 2 国内外液化烃罐区泄漏及火灾爆炸事故典型案例

Table 2 Typical leakage and fire & explosion accidents of liquefied hydrocarbon storage tank

案例	事故概要	事故类型	储存方式
1	2011 年日本千叶县炼油厂火灾爆炸事故	LPG 泄漏、池火、BLEVE	全压力式
2	2011 年上海赛科石油化工有限公司低温罐区烯烃管线爆炸燃烧事故	超临界状态丙烯因管线破裂而爆炸燃烧	全冷冻式
3	2010 年中国石油天然气有限公司兰州石化分公司 316 罐区火灾爆炸事故	C_4 泄漏、空间爆炸、池火、BLEVE	全压力式
4	2006 年辽宁抚顺市东洲区液化气公司泄漏事故	LPG 泄漏	全压力式
5	2004 年葫芦岛市龙湾新区天然气分离厂液化石油气储罐泄漏事故	LPG 泄漏	全压力式
6	2003 年广州白云山区钟落潭镇液化石油气储罐泄漏事故	LPG 泄漏	全压力式
7	1999 年洛阳市凯达高能气体公司丙烷储罐泄漏事故	丙烷泄漏	全压力式
8	1998 年韩国富川市液化石油气加气站火灾爆炸事故	LPG 泄漏、空间爆炸、池火、BLEVE	全压力式
9	1998 年陕西省西安市煤气公司火灾爆炸事故	LPG 泄漏、空间爆炸、池火、BLEVE	全压力式
10	1997 年北京东方化工厂储罐区爆炸事故	乙烯储罐 BLEVE、池火	全压力式
11	1995 年法国福斯港口液化天然气池火事故	LNG 池火、热传递类蒸气爆炸	全冷冻式
12	1995 年法国蒙图瓦尔市液化天然气接收站泄漏事故	LNG 泄漏、热传递类蒸气爆炸	全冷冻式
13	1993 年印尼液化设备厂液化天然气泄漏事故	LNG 泄漏、热传递类蒸气爆炸	全冷冻式
14	1988 年上海高桥石化公司炼油厂小梁山液化气储罐区火灾爆炸事故	LPG 泄漏、空间爆炸、池火	全压力式
15	1984 年美国墨西哥城液化石油气站火灾爆炸事故	LPG 泄漏、空间爆炸、池火、BLEVE	全压力式
16	1979 年美国马里兰州液化天然气接收站火灾爆炸事故	LNG 泄漏、空间爆炸	全冷冻式
17	1977 年阿尔及利亚阿尔泽液化天然气生产厂泄漏事故	LNG 泄漏	全冷冻式
18	1973 年英国肯维岛液化天然气泄漏事故	LNG 泄漏、热传递类蒸气爆炸	全冷冻式
19	1971 年意大利拉斯佩齐亚港口液化天然气接收站储罐泄漏事故	LNG 气相泄漏	全冷冻式
20	1944 年美国俄亥俄州克利夫兰市调峰型液化天然气储罐火灾爆炸事故	LNG 泄漏、热传递类蒸气爆炸、空间爆炸	全冷冻式

2 液化烃储罐的泄漏危险

泄漏不仅是液化烃储罐最常见的危险类型,且往往会成为火灾爆炸事故的开端。

2.1 全压力式液化烃储罐的泄漏

目前中国液化烃的储存仍以全压力式储罐为主,其中球罐的应用最为普遍。总体上看,全压力式液化烃储罐发生泄漏的概率为 4.7×10^{-5} 罐⁻¹·年⁻¹;开口尺寸越小的泄漏发生概率越大,储罐管道损坏和阀门、法兰失效等引起的小尺寸开口(1~3mm)泄漏概率为 2.3×10^{-5} 罐⁻¹·年⁻¹,泄漏开口直径大于150mm的大型灾难性破裂的发生概率为 4.7×10^{-7} 罐⁻¹·年⁻¹,如表3所示^[28]。表2列出的11起全压力式液化烃泄漏事故中有4起(案例4、5、6和7)得到了及时成功处置,另外7起(案例1、3、8、9、10、14和15)均发生了次生的火灾爆炸事故。

表3 全压力式液化烃储罐不同泄漏开口直径及其发生概率
Table 3 Pressure vessel leak frequencies

泄漏开口直径/mm		泄漏概率/ (罐 ⁻¹ ·年 ⁻¹)
直径范围	当量直径	
1~3	2	2.3×10^{-5}
3~10	5	1.2×10^{-5}
10~50	25	7.1×10^{-6}
50~150	100*	4.3×10^{-6}
>150	灾难性破裂	4.7×10^{-7}

注:*如果最大连接管线直径大于100mm,则取最大连接管线的直径。
Notes: *diameter of the largest pipe connection is taken if it is larger than 100.

2.2 全冷冻式液化烃储罐的泄漏

2.2.1 储罐的结构特点

全冷冻式液化烃储罐结构类型较多,主要有单防罐、双防罐和全防罐等形式(图1~图3)^[29]。单防罐只有一个主罐,周围需设置防火堤。双防罐和全防罐结构相似,除主罐外还有用于限制主罐泄漏物料的副罐(分为钢结构和预应力混凝土结构两种构造方式)。双防罐的副罐为敞开结构,只能容纳液相液化烃,不能限制气相液化烃的扩散;全防罐是密闭结构,既能容纳液相液化烃,又能阻止气相液化烃外逸。目前大型LNG常压储罐以全防罐居多^[30]。

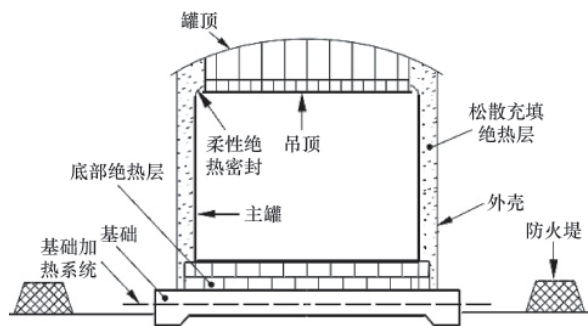


图1 单防罐结构示意图

Fig. 1 Example of single containment tank

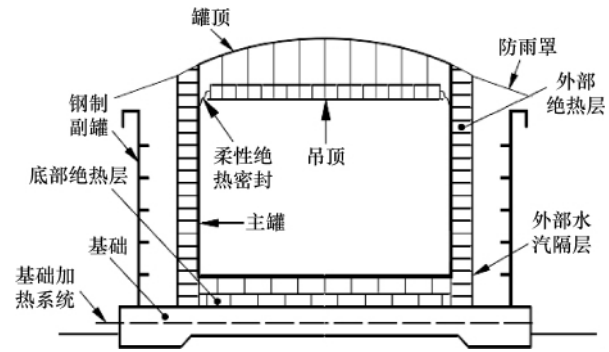


图2 双防罐结构示意图

Fig. 2 Example of double containment tank

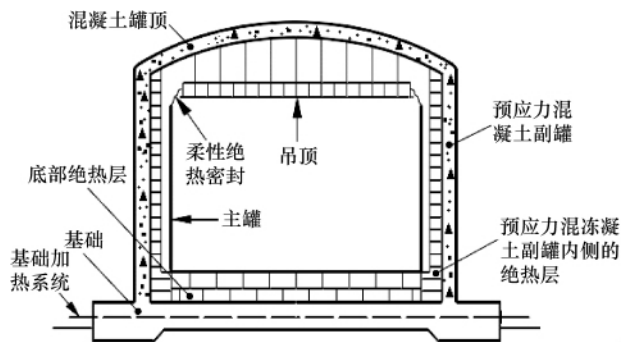


图3 全防罐结构示意图

Fig. 3 Example of full containment tank

2.2.2 储罐的泄漏概率

研究表明,全冷冻式液化烃储罐主罐发生泄漏的概率为 3.0×10^{-5} 罐⁻¹·年⁻¹。不同结构的全冷冻式液化烃储罐发生泄漏的概率不同,其中已有单防罐主罐及副罐发生大型灾难性破裂的泄漏概率较高,分别为 2.3×10^{-5} 和 7.3×10^{-6} 罐⁻¹·年⁻¹;新建单防罐次之;双防罐和全防罐最小,其主罐发生大型灾难性破裂的概率均为 1.0×10^{-7} 罐⁻¹·年⁻¹,副罐发生大型灾难性破裂的泄漏概率分别为 2.5×10^{-8} 和 1.0×10^{-8} 罐⁻¹·年⁻¹(表4)^[28]。表2列出的9起全冷冻式液化烃泄漏事故中除了2起(案例17和19)得到了及时成功处置,另外7起(案例2、11、12、13、16、18和20)都发生了次生的火灾爆炸事故。

表4 不同结构全冷冻储罐的泄漏概率

Table 4 Refrigerated storage tank leak frequencies

储罐类型	灾难性破裂的概率/(罐 ⁻¹ ·年 ⁻¹)	
	主罐泄漏*	副罐泄漏**
已有单防罐	2.3×10^{-5}	7.3×10^{-6}
新建单防罐	2.3×10^{-6}	7.3×10^{-7}
双防罐	1.0×10^{-7}	2.5×10^{-8}
全防罐	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-8}

注:*液池面积为主罐与副罐所形成的环形面积;**对单防罐而言对应于泄漏的液化烃溢出防火堤的情况。

Notes: * the pool area is that of the secondary containment.; ** for single containment tanks this scenario corresponds to bund overtopping.

2.3 液化烃泄漏过程中的吸热气化

液化烃的吸热气化过程与其自身的物理性质(如标准沸点温度、气化潜热、比热容等)、储存状态(如温度、压力等)及环境因素(如环境温度、液化烃泄漏后接触到的材料及其温度等)有关,主要分为气化与气相升温两个阶段。影响气化过程的因素主要包括过热液相液化烃的储存温度与标准沸点温度的差值、液化烃的气化质量和液化烃的气化潜热;气相升温过程则主要受气相液化烃的质量、气相液化烃的比热容和气相液化烃的温度与标准沸点温度的差值等因素的影响。对全压力储存方式而言,液相液化烃泄漏时往往处于过热状态(发生 BLEVE 时可近似认为泄漏出的液相液化烃处于标准沸点温度),其气化速度和气化量均比全冷冻液化烃高,吸热冷冻危害相对较小;全冷冻液化烃在常压低沸点温度下储存,泄漏时强烈的吸热作用会造成极大的冷冻伤害,表 5 给出了常见液化烃的标准沸点温度、气化潜热和气相液化烃的比热容^[1-39]。即使是相同储存状态的液化烃在相同的环境下泄漏,不同类型液化烃的气化速率也各不相同,并且气化速率会随着周围环境温度的降低而不断减缓。有实验研究表

表 5 常见液化烃的标准沸点温度、气化潜热与比热容

Table 5 Atmospheric boiling point, latent heat of vaporization and specific heat capacity of typical liquefied hydrocarbon

名称	沸点/°C	气化潜热/ (kJ·kg ⁻¹)	气相比热容/ (J·mol ⁻¹ ·°C ⁻¹)
正丁烷	-0.5	385	85.33~111.7
异丁烷	-11.7	366	83.69~111.9
丁二烯	-4.5	417	24.46~89.85
丙烷	-42	425	62.93~84.91
丙烯	-47.7	437	15.16~72.52
乙烷	-88.6	487	45.72~59.62
乙烯	-103.7	482	11.43~49.15
甲烷	-161.5	509	35.66~38.48

明,LNG 泄漏至 0.9m×0.9m×0.61m 的混凝土集液池内时,最初的质量蒸发速率为 0.0338kg·m⁻²,然后不断减小,最后趋于稳定值 0.012kg·m⁻²[34]。

3 液化烃储罐火灾爆炸危险的分析判断

为了有针对性地采取消防措施,正确分析判断各类液化烃在不同储存方式下的火灾爆炸危险类型是非常有必要的,图 4 给出了液化烃储罐常见火灾爆炸危险的分析判断流程。可以看出,空间爆炸、孔口火灾和池火是液化烃全压力储存和全冷冻储存两种方式共有的火灾爆炸危险类型,前者有发生 BLEVE 并形成火球的危险,后者泄漏出的低温液化烃与水接触有发生热传递类蒸气爆炸的可能。表 6 给出了液化烃储罐常见火灾爆炸危险类型的比较。

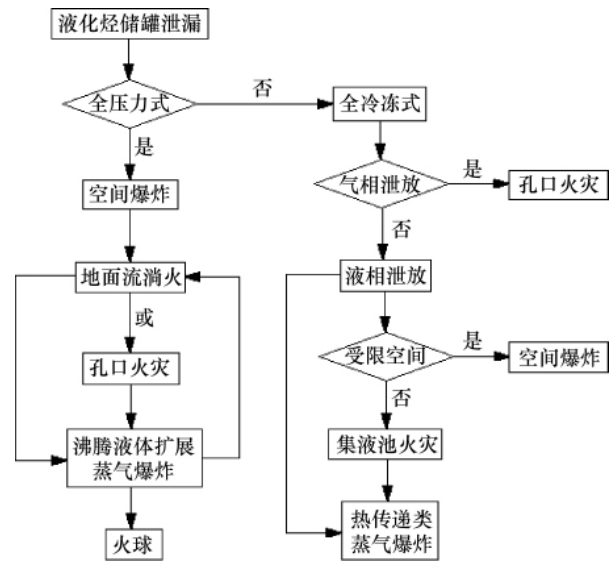


图 4 液化烃储罐常见火灾爆炸事故类型分析判断流程
Fig. 4 Flow chart for typical fires and explosions of liquefied hydrocarbon storage tank

表 6 液化烃储罐常见火灾爆炸危险类型比较

Table 6 Comparison of typical fires & explosions of liquefied hydrocarbon in pressurized and refrigerated storage tanks

储存方式	爆炸事故类型			火灾事故类型		
全压力式	空间爆炸	沸腾液体扩展蒸气爆炸	—	孔口火灾	池火	火球
全冷冻式	空间爆炸	—	热传递类蒸气爆炸	孔口火灾	池火	—

3.1 泄漏与空间爆炸

无论液化烃是以全压力方式储存还是以全冷冻方式储存,泄漏的液化烃气化扩散后遇点火源都有发生空间爆炸的可能。相比之下,全冷冻方式储存的液化烃泄漏后发生空间爆炸的可能性相对较小。这是因为以全压力方式储存的液化烃泄漏后气化形成的蒸气通常比空气重,容易在地面附近沉

积,而以全冷冻方式储存的低温液化烃气体在较低温度下就会快速升腾扩散(温度高于-114°C时,LNG 气体就会快速升腾扩散),不容易形成可燃气体混合物。但当低温液相液化烃泄漏进入地下管网等受限空间时,则容易发生相对密闭空间的爆炸。表 2 中案例 16 和案例 20 两起冷冻液化天然气火灾爆炸事故都是由于泄漏的液相 LNG 流淌至下水道和地下电

缆管网后发生的低位受限空间爆炸。

空间爆炸常常会导致后续各类火灾爆炸事故,表2列出的20起事故案例中有7起(案例3、8、9、14、15、16和20)在泄漏时先发生了空间爆炸燃烧,进而又引发了其他类型的火灾爆炸事故。在处置发生了液化烃大规模泄漏、并且有可能发生空间爆炸的事故时,必须要充分考虑保护抢险救援人员人身安全的措施。

3.2 孔口火灾

全压力式液化烃储罐和全冷冻式液化烃储罐都可能会形成孔口火灾。前者较为常见,通常在气液相泄漏口或气相安全泄放开口处形成;后者相对较少,主要发生在气相安全泄放开口处(如表2中事故案例19)。靠近罐体的低位孔口火灾对储罐自身有一定的加热作用,会促进全压力式液化烃储罐 BLEVE 的发生。孔口火灾常常在空间爆炸、池火、沸腾液体扩展蒸气爆炸与火球等类型的火灾爆炸发生时形成。

3.3 池火

池火是全压力储存液化烃和全冷冻储存液化烃共有的火灾类型。全压力式液化烃液相泄漏遇点火源会形成地面流淌火,若有 BLEVE 发生则会形成更大面积的地面流淌火;全冷冻式液化烃液相泄漏,除了意外流入地下管网系统可能引发低位密闭空间爆炸的情况,若被引流至集液池,则有发生集液池火灾的可能。表2中有8起事故(案例1、3、8、9、10、11、14和15)形成了池火,除案例11为LNG集液池火灾外,其余7起均为全压力储存液化烃泄漏形成的地面流淌火。有效抑制液化烃的进一步气化是成功扑救液化烃池火的关键所在。

3.4 沸腾液体扩展蒸气爆炸与火球

沸腾液体扩展蒸气爆炸(BLEVE)与火球是全压力式液化烃储罐特有的爆炸火灾类型,全冷冻方式储存的液化烃在常压下储存,不具备压力平衡被破坏的条件,不会发生 BLEVE^[22,35]。除储罐本身因强度下降造成的罐体局部开放,地面流淌火或孔口火等外部火源的加热作用是导致全压力式液化烃储罐因内部压力超高破裂而发生 BLEVE 的最常见原因。BLEVE 形成的爆炸碎片和火球的热辐射往往具有较强的破坏作用。表2中11起全压力式液化烃储罐事故有6起(案例1、3、8、9、10和15)发生了 BLEVE,案例9中有2个400 m³ LPG 球罐相继发生了 BLEVE,形成的火球引燃了距罐区约360 m处的棉花仓库;案例15中连续发生的多次 BLEVE 及其形成的火球是造成数百人惨重伤亡的主要原因。因而在处置全压力式液化烃储罐的泄漏及火灾爆炸事故时务必要有效预警 BLEVE 并做好相应的防范工作。

3.5 全冷冻液化烃的热传递类蒸气爆炸

全冷冻方式储存的液化烃在液相泄漏或火灾扑救过程中与水接触时,有发生热传递类蒸气爆炸的可能。水作为高温物对于低温液化烃的加热作用会造成液化烃的大量快速气化,进一步扩大火势,加大火灾扑救的难度。这也是不能用

水而只能用高倍数泡沫抑制液化烃气化及池火的主要原因。表2中9起全冷冻液化烃事故有5起(案例11、12、13、18和20)都发生了热传递类蒸气爆炸。

4 结论

液化烃本身所具有的高度易燃性及其储存方式的多样性决定了液化烃储存过程中泄漏及火灾爆炸危险的复杂性,泄漏、空间爆炸、孔口火灾、池火、沸腾液体扩展蒸气爆炸与火球、热传递类蒸气爆炸等都是液化烃储存过程中常见的火灾爆炸事故类型,科学合理地分析判断不同类型的泄漏与火灾爆炸危险是采取针对性消防措施的前提。

(1) 总体上看,全压力式液化烃储罐发生泄漏的概率为 4.7×10^{-5} 罐⁻¹·年⁻¹,开口尺寸越小,泄漏发生概率越大,储罐发生泄漏开口直径大于150mm的大型灾难性破裂的概率为 4.7×10^{-7} 罐⁻¹·年⁻¹;全冷冻式液化烃储罐的泄漏概率(3.0×10^{-5} 罐⁻¹·年⁻¹)基本与全压力式液化烃储罐相当,不同结构的储罐发生泄漏的概率各不相同,双防罐和全防罐主罐发生大型灾难性破裂的概率为 1.0×10^{-7} 罐⁻¹·年⁻¹。

(2) 液化烃的吸热气化过程与其自身的物理性质、储存状态及环境因素有关,与全压力储存方式相比,全冷冻方式储存的液化烃泄漏时的强烈吸热作用会造成更为严重的冷冻伤害破坏。

(3) 无论液化烃是以全压力方式储存,还是以全冷冻方式储存,都有可能发生空间爆炸或形成孔口火灾和池火。相比之下,以全压力方式储存的液化烃泄漏后更容易发生空间爆炸,其气液相孔口火灾和地面流淌火也较为常见;全冷冻低温液化烃泄漏进入地下管网等受限空间时有发生空间爆炸的可能,其孔口火灾主要发生在气相安全泄放开口处,池火则以集液池火灾为主。

(4) 液化烃全压力储存方式因储罐内过热平衡状态的破坏有发生 BLEVE 并形成火球的危险;全冷冻式储存的常压低温液化烃与水接触时则有发生热传递类蒸气爆炸的可能。

参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50160—2008 石油化工企业设计防火规范[S].北京:中国计划出版社,2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 50160—2008 Fire prevention code of petrochemical enterprise design[S]. Beijing: China Planning Press, 2009.
- [2] 殷劲松,马小红,陈叔平.大型LNG储罐关键技术[J].燃气与热力,2011,31(7): B13-B17.
Yin Jinson, Ma Xiaohong, Chen Shuping. Gas & Heat, 2011, 31(7): B13-B17.
- [3] 黄群,夏芳.LNG储罐国产化的可行性[J].天然气工业,2010,30(7):

- 80-82.
Huang Qun, Xia Fang. Natural Gas Industry, 2010, 30(7): 80-82.
- [4] Raj P K. LNG fires: A review of experimental results, models and hazard prediction challenges [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 140(3): 444-464.
- [5] Anay L H. A review of large-scale LNG spills: experiments and modeling [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 132(2-3): 119-140.
- [6] Koopman R P, Ermak D L. Lessons learned from LNG safety research[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 140(3): 412-428.
- [7] Cleaver P, Johnson M, Ho B. A summary of some experimental data on LNG safety[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 140(3): 429-438.
- [8] Bi M S, Ren J J, Zhao B, et al. Effect of fire engulfment on thermal response of LPG tanks [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(2): 874-879.
- [9] Stawczyk J. Experimental evaluation of LPG tank explosion hazards[J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 96(2-3): 189-200.
- [10] AcuTech Consulting Group. Fire service guidance for participating in LNG terminal evaluation, siting, and operations[R]. 2007.
- [11] Suardin J A, Qi R F, Cormier B R, et al. Application of fire suppression materials on suppression of LNG pool fires [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011, 24(1): 63-75.
- [12] Rana M A, Guo Y Y, Mannan M S. Use of water spray curtain to disperse LNG vapor clouds[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010, 23(1): 77-88.
- [13] Suardin J A, Wang Y J, Willson M, et al. Field experiments on high expansion (HEX) foam application for controlling LNG pool fire[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165(1-3): 612-622.
- [14] Shirvill L C. Efficacy of water spray protection against propane and butane jet fires impinging on LPG storage tanks [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2004, 17(2): 111-118.
- [15] Roberts T A. Directed deluge system designs and determination of the effectiveness of the currently recommended minimum deluge rate for the protection of LPG tanks [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2004, 17(2): 103-109.
- [16] Frame J. Attacking the LNG [J]. Fire & Rescue, 2010(3): 46-48, 50.
- [17] Richardson K. Whims of the weather[J]. Industrial Fire Journal, 2010 (1): 22-23.
- [18] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. SH 3136—2003 液化烃球形储罐安全设计规范[S]. 北京: 中国石化出版社, 2004.
National Development and Reform Commission. SH 3136—2003 Design specification for safety of liquefied hydrocarbon spherical tanks [S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2004.
- [19] 国家能源局. NB/T 47001—2009 钢制液化石油气卧式储罐型式与基本参数[S]. 北京: 新华出版社, 2010.
National Energy Administration. NB/T 47001—2009 Steel liquefied petroleum gas horizontal tanks type and data base [S]. Beijing: Xinhua Press, 2010.
- [20] Talbot P. Chiba refinery —A risk engineer based in marsh energy practice's London offices, review the Chiba refinery incident in Japan in 2011[J]. Industrial Fire Journal, 2012(3): 27-28.
- [21] 吴建平, 万国强, 张云飞. 兰州石化“1.7”爆炸事故原因分析[J]. 消防技术与产品信息, 2011(1): 37-39.
Wu Jianping, Wan Guoqian, Zhang Yunfei. Fire Technique and Products Information, 2011(1): 37-39.
- [22] Ducommun J C. BP process safety series—LNG fire protection & emergency response[M]. Dorchester: Henry Ling, 2007.
- [23] Park K, Mannan M S, Jo Y D, et al. Incident analysis of Bucheon LPG filling station pool fire and BLEVE [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(1): 62-67.
- [24] 公安部消防局. 中国火灾统计年鉴 2002 [M]. 北京: 中国人事出版社, 2002.
Fire Department of Ministry of Public Security. Chinese fire statistics yearbook of 2002[M]. Beijing: China Human Resources Press, 2002.
- [25] 公安部消防局. 中国火灾统计年鉴 1999 [M]. 北京: 中国人民公安大学出版社, 1999.
Fire Department of Ministry of Public Security. Chinese fire statistics yearbook of 1999 [M]. Beijing: The Chinese People's Public Security University Press, 1999.
- [26] 公安部消防局. 中国火灾统计年鉴 1998 [M]. 北京: 警官教育出版社, 1998.
Fire Department of Ministry of Public Security. Chinese fire statistics yearbook of 1998[M]. Beijing: China Police Education Press, 1998.
- [27] Pietersen C M. Analysis of the LPG-disaster in Mexico City [J]. Journal of Hazardous Materials, 1988, 20(1-3): 85-107.
- [28] International Association of Oil & Gas Producers. Risk assessment data directory-storage incident frequencies[R]. London: OGP, 2010.
- [29] BS EN 14620 -1. Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0°C and -162°C[S]. London: British Standards Institution, 2006.
- [30] 柳山. 液化天然气(LNG)全容储罐结构和性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
Liu Shan. Study on structure & performance of LNG full containment tanks[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009.
- [31] Frame J. LNG response series- part one: handling the cryo-factor[J]. Industrial Fire Journal, 2010(2): 26-28.
- [32] Frame J. LNG response series- part two: handling the cryo factor[J]. Industrial Fire Journal, 2010(3): 32-35.
- [33] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册: 有机卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
Liu Guangqi, Ma Lianxiang, Liu Jie. Chemical property data handbook: Organic[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [34] Yun G W. Control of vapor dispersion and pool fire of Liquefied Natural Gas (LNG) with expansion foam [D]. Texas: Texas A&M University, 2010.
- [35] 顾安忠. 液化天然气技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
Gu Anzhong. Liquefied natural gas technical handbook [M]. Beijing: China Machine Press, 2010.

(责任编辑 赵业玲)