

LPG 罐区火灾爆炸危险性的定量评价

吴 玫, 勾红英, 袁 东

(四川理工学院材料与化学工程学院, 四川 自贡 643000)

摘 要:文章分析了对液化石油气储罐区物质危险性和常见事故类型,就罐区而言,池火灾、蒸气云爆炸(VCE)和沸腾液体扩展蒸气云爆炸(BLEVE)是三种常见事故。选用池火灾和蒸气云爆炸简化数学模型对液化石油气储罐区的火灾事故后果进行了定量评价,确定了火灾事故的人员伤害和财产损失范围。所得结果对于储罐区安全距离、防火堤设计及事故应急救援具有一定的指导意义。

关键词:液化石油气;池火灾;蒸气云爆炸

中图分类号:X928.7

文献标识码:A

随着社会的发展,液化石油气(LPG)作为一种污染小、价格低、资源丰富的能源越来越受到重视,各地液化石油气储配站建设项目日益增多。在液化石油气储配运行过程中,泄漏是最可能和容易酿成重大事故的危险有害因素。导致储罐发生突发性泄漏事故的原因有很多,统计表明,储罐本身失效(裂纹、腐蚀、破裂)、阀门损坏所占的比例最大^[1]。一旦因罐体、管道、阀门、附件或法兰连接处发生泄漏,发生火灾爆炸危险的可能性比较大,因此对事故的影响范围和伤害程度进行定量评价,依据定量评价结果制定有针对性、可操作性的安全对策措施,对于罐区安全设计和应急救援措施的制定具有重要的意义。目前,国内外已有数十种安全评价方法,每种评价方法均具有不同的特点和不同的适用范围。就罐区而言,池火灾、蒸气云爆炸(VCE)和沸腾液体扩展蒸气云爆炸(BLEVE)是三种常见的事故模式。本文选取池火灾热辐射和蒸气云爆炸数学模型对某大型在建液化石油气储配站工程进行了事故后果严重度的模拟分析。工程主体由4台5000 m³液化石油气储罐组成,球罐内径21.2 m,设计压力1.80 Mpa,设计温度-10℃~55℃。一个储罐底部DN200进油管管道破裂出现长50 cm,宽1 cm的泄漏口,泄漏10分钟后泄漏源被切断。

1 液化石油气物质危险性分析

液化石油气即经高压或低温液化的石油气,为甲 A

类火灾危险性液体,闪点低,极易燃,在空气中只需要很小的点火能量;沸点很低,容易通过蒸发产生引起燃烧所需的最低限度的蒸气量,从而增大火灾危险性。主要成份与空气混合物的爆炸下限均在2%左右,发生爆炸的危险性非常大。液化石油气主要成分包括丙烷、丙烯、丁烷和丁烯,同时还含有少量的甲烷、乙烷及H₂S、CO、CO₂等杂质,不同生产过程中得到的液化石油气,其组成有所差异,所含主要组分相关物性参数及危险等级见表1。

表1 液化石油气成分火灾危险特性

特性参数	丙烷	丁烷	丙烯	丁烯
闪点(℃)	-104	-60	-108	-80
引燃温度(℃)	450	287	455	385
最小点火能(mJ)	0.31	0.25	0.282	-
沸点(℃)	-42.1	-0.5	-47.7	-6.3
爆炸极限(v%)	9.5~2.1	8.5~1.5	11.7~2.0	10~1.6
危险性类别	第2.1类易燃气体			
火灾危险分类	甲			

2 LPG 罐区火灾危险性定量评价过程

2.1 LPG 罐区主要火灾事故类型

池火灾、蒸气云爆炸和沸腾液体扩展蒸气云爆炸是液化石油气罐区较为常见的事故类型。池火灾是指可燃液体储罐内起火,或储罐泄漏后可燃液体散流在地面、水面上所形成的液面池,遇火源发生的火灾现象。池火灾的危险性主要是池火灾火焰热辐射对附近人员

的伤害和对周围建筑物和设备的破坏。加压储存的液化石油气温度远高于常压下的沸点,泄漏后急速气化与周围空气混合形成蒸气云;若采用低温常压储存,发生泄漏后流出的液体吸收环境和地面等周围的热量而急速沸腾,在短时间内也可生成大量的蒸气云。在储备站或生产企业储罐区,可燃液体大量泄漏,如果没有立即引发大火或发生沸腾液体膨胀蒸气云爆炸现象,混合蒸气云不易逸散,遇火源点燃发生蒸气云爆炸的可能性较大。蒸气云爆炸除高温燃烧产生热辐射等伤害外,冲击波是造成对周围人员、建筑物、设备的伤害、破坏作用的主要因素。沸腾液体扩展蒸气云爆炸指液化介质储罐在外部火焰的烘烤等条件下突然破裂,压力平衡破坏,介质急剧气化,并随即被火焰点燃而产生的爆炸。BLEVE 的危害主要包括火球热辐射、爆炸冲击波超压和产生容器碎片。与火球热辐射的危害相比,爆炸冲击波超压和容器碎片的危害相对较小。

2.2 池火灾事故后果模拟

泄漏的液体在防火堤内形成液池,若遇到火源可能被点燃,发生地面液池火灾。液化石油气泄漏速率用伯努利公式计算。

$$Q_0 = C_i A \rho \sqrt{2(P - P_0) / \rho + 2gh}$$

式中: Q_0 —液体泄漏速度, kg/s; C_i —液体泄漏系数, 取值 0.55; A —泄漏口面积, m^2 ; P —泄漏液体密度, kg/m^3 ; P —容器介质压力, Pa; P_0 —大气压力, Pa; g —重力加速度, $9.8 m/s^2$; h —裂口之上液位高度, 安全高度 16 m。

池火灾采用圆柱形火焰和液池面积恒定假设, 火焰高度计算式为:

$$h = 84r [m_f / (\rho_0 \sqrt{2gr})]^{0.6}$$

总热辐射通量 Q 采用点源模型式计算:

$$Q = (\pi r^2 + 2\pi rh) \cdot m_f \cdot \eta \cdot Hc / (72m_f^{0.61} + 1)$$

式中: ρ_0 —环境空气密度, $1.293 kg/m^3$; r —液池半径, 16 m; m_f —燃烧速率, $0.03 kg/(s \cdot m^2)$; η —燃烧效率因子, 取值 0.35; S —液池面积, m^2 ; Q —总热辐射通量, W 。

计算结果得, 泄漏液体速率 125.34 kg/s, 池火焰高度 24 m, 总热辐射通量 261 455 kW。辐射热量由液池中心小球面发出, 距池中心距离 x (m) 处的热辐射强度 I (W/m^2) 为:

$$I = Q t_c / 4\pi x^2$$

式中, t_c —热传导系数, 取值 1。

火灾损失估算建立在辐射通量与损失等级的相应关系上, 当火灾产生的热辐射强度足够大时, 可使周围的物体燃烧或变形, 强烈的热辐射可能烧毁设备甚至造

成人员伤亡。池火灾通常采用热通量准则^[2]。目标接收到的热通量大于或等于引起目标破坏所需的临界热通量时, 目标被破坏, 准则的适用范围为热通量作用的时间比目标达到热平衡所需要的时间长^[3]。池火灾热辐射下人员伤亡和财产损失情况见表 2。

表 2 池火灾热辐射人员伤亡和设备破坏的热通量准则

热辐射通量 (kW/m^2)	人员伤亡	设备损害
37.5	10s 内 1% 死亡/ 1min 内 100% 死亡/	操作设备全部损坏
25	10s 内 重大烧伤; 1min 内 100% 死亡	无火焰、长时间辐射, 木材燃烧最小能量
12.5	10s 内 1 度烧伤; 1min 内 1% 死亡	有火焰, 木材燃烧、塑 料熔化的最低能量
4	可能导致 1 度烧伤, 0% 死亡	

2.3 蒸气云爆炸事故后果模拟

蒸气云爆炸事故严重度采用 TNT 当量法, 按超压冲量准则确定人员伤亡区域和财产损失区域^[4-5]。蒸气云爆炸总能量和 TNT 当量计算式为:

$$E = aAW_f Q_f$$

$$W_{TNT} = E / Q_{TNT}$$

式中: E —蒸气云爆炸总能量, kJ; W_{TNT} —TNT 当量, kg; Q_{TNT} —TNT 爆热, 4 520 kJ/kg; W_f —蒸气云燃油质量, Kg; Q_f —燃料高值燃烧热, 46 264 kJ/kg; α —地面爆炸修正系数, 1.8; A —蒸气云当量系数, 0.04。

死亡半径 R_1 :

$$R_1 = 13.6 (W_{TNT} / 1000)^{0.37}$$

重伤区半径 R_2 :

$$\Delta P = 0.137Z^{-3} + 0.119Z^{-2} + 0.269Z^{-1} - 0.019$$

$$R_2 = Z (W_{TNT} / P_0)^{1/3}$$

其中, ΔP —冲击波超压, kPa; P_0 —大气压力, 101.3 kPa。

轻伤区半径 R_3 计算过程相同, 重伤冲击波超压取 44 kPa, 此时人员因冲击波作用而耳膜破裂的概率为 50%; 轻伤冲击波超压取 17 kPa, 人员因冲击波作用而耳膜破裂的概率为 1%。

财产破坏半径 R_4 :

$$R_4 = K_{II} W_{TNT}^{1/3} [1 + (3175 / W_{TNT})^2]^{1/6}$$

其中, K_{II} —二级破坏系数, 即一般建筑物受到严重破坏, 0.56。

3 LPG 储罐火灾事故评价结果与分析

一个 5 000 m^3 的液化石油气储罐底部进油管道破裂发生十分钟泄漏后, 储罐区如果仅发生池火灾, 造成

的人员伤害和财产损失半径比发生蒸气云爆炸小得多。以圆形伤害区域作为假设,两种事故类型的人员死亡、重伤和轻伤范围见表3。在池火灾事故情况下,距离池火中心41 m的范围内财产全部或部分损失。蒸汽云爆炸事故财产损失半径达到441 m。

表3 池火焰热辐射和蒸气云爆炸模型评价结果

事故类型	死亡半径 (m)	重伤半径 (m)	轻伤半径 (m)
池火灾	24	29	41
蒸气云爆炸	141	300	539

在火灾事故后果的定量分析中,池火灾模型采用了点源模式进行了简化;采用TNT当量法进行蒸气云爆炸后果模拟时,TNT是凝聚相高爆炸药,而蒸气云体积很大,会高估近场处超压和远场处爆炸效应。且实际情况下LPG罐区的火灾事故是不同类型交替进行的,同时周边环境和气候条件都会增加火灾后果分析的复杂性,评价结果的精度会受到影响,但模拟反应了适宜于工程应用的辐射规律性。池火焰高度随液池直径的增大而增大,火焰表面热辐射通量、各类伤害和破坏半径显著增大,因此合理地进行储罐区布置和防火堤设计防止燃料泄漏后任意蔓延,对于减轻池火灾的危险性具有十分重要的意义。一旦发生池火灾,必须防止发生蒸气云爆炸

事故的出现,及时有效地对贮罐进行冷却并启动灭火系统。本次模拟的液化石油气泄漏量仅占到不到罐体实际储存量的5%,若火灾不能得到有效控制,火焰热辐射下储罐发生灾难性的失效,LPG会发生爆炸性气化,即形成BLEVE火球爆炸,造成的灾害损失和事故后果将难以控制,极为严重。

参考文献:

- [1] 王三明.化工过程爆炸灾害模拟评价及防灾决策支持系统研究[D].南京:南京工业大学,2002.
- [2] BirK A M,Anderson R J,Copents A J.A computer simulation of a derailment accident: partl-modal basis [J]. Journal of Hazardous Materials,1990(25):143-147.
- [3] 陈思凝,孙金华,王青松.液化石油气泄漏的危险性分析及其事故后果评价方法[J].中国工程科学,2005,7(9):61-64.
- [4] 刘茂,杜雅萍,许长增,等.液化石油气罐区危险性的定量评价[J].中国安全科学学报,1997,7(6):45-48.
- [5] 王玉海,李曦滨,李茸,等.曹村煤矿十采区水文地质条件与突水危险性分析[J].河北工程大学学报:自然科学版,2010,27(3):66-68.

Quantitative Hazard Evaluation for the Area of Liquefied Petroleum Gas Storage Vessels

WU Mei, GOU Hong-ying, YUAN Dong

(School of Material and Chemical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: Material hazards and major accident types in the area of liquefied petroleum gas storage vessels are analyzed in the article. As far as the tank farm is concerned, pool-fire, vapor cloud explosion (VCE) and boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE) are three kinds of major risks. Mathematical models of pool-fire and VCE are performed in quantitative assessment for fire accident consequence. People hurt and property loss scopes are obtained. Assessment results can be used to guide safety distance and fire-dike design in tank farm and accident emergency rescue.

Key words: liquefied petroleum gas; pool-fire; VCE