

LNG 储罐火灾热辐射的安全距离影响因素研究

谢顶杉 廖 勇 王 非 王 科 田东民

中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司, 四川 成都 610041

摘 要:对 LNG 泄漏的危害性和池火热辐射的理论模型进行了研究,通过 DNVPHAST 软件计算,分析了池火火灾热辐射的安全距离影响因素,得到了风速、大气稳定度、泄漏量及围堰尺寸对池火热辐射的影响情况和影响程度。研究发现,风速、泄漏量和围堰尺寸对热辐射的影响范围都有不同程度的影响,其中泄漏量影响最大,而大气稳定度对热辐射的范围影响相对较小。

关键词:储罐;池火;热辐射;评价模型;安全距离

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2016.03.006

0 前言

液化天然气(LNG)具有热值高、体积小、无腐蚀等特点,是全球公认的清洁能源。随着 LNG 在工业和民用领域的应用不断扩大,LNG 发生火灾、爆炸事故的概率也随之增加。因此,研究引起 LNG 发生火灾、爆炸等事故的影响范围和影响因素,对指导现场事故的预防和控制有重要的意义。

LNG 常压下沸点值为 $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$,气液体积比约为 625,LNG 的燃烧热值达 50 MJ/kg ,火焰表面辐射力为 220 kW/m^2 ,爆炸范围为 $5\%\sim 15\%$ ^[1]。因此,LNG 一旦发生泄漏,会在低洼地带形成液池,液池内液体初始发生闪蒸气化,会瞬间产生大量蒸气;当蒸气云体积比在爆炸极限范围内并遇上火源时,便发生蒸气云爆炸事故。若蒸气云正好处于液池上方,便会迅速向液池回火燃烧,形成池火火灾^[2];池火火焰及热辐射将对周边人员、设备和设施产生严重危害。分析研究 LNG 池火火灾热辐射等危害是 LNG 安全评价一个不可缺少的方面。

1 LNG 泄漏的危险性分析

LNG 发生泄漏不仅会产生蒸气云爆炸事故和池火

火灾,还会产生其他危害^[3-4]。

甲烷是一种低毒性、窒息性的气体。大量 LNG 从 LNG 储罐或者 LNG 输送管道的破损口溢出气化。即使没有遇到火源,但是仍然会导致空气中甲烷的浓度非常高,进而对工厂巡检人员、应急人员或者其他可能暴露于正急剧扩散的天然气气团中的人员造成窒息伤害;而且超低温 LNG 还会对泄漏区域附近的人员或设备产生低温灼伤或者低温破坏。

一般来说,气体的燃烧和爆炸都能产生热负荷和压力负荷。通常用火灾造成的热辐射损害的等级来区分和建立火灾危险区。对于热负荷,美国国家防火协会推荐用 5 kW/m^2 的事故热通量值来确定人员的安全防火距离^[5]。热辐射在通常情况下的损害等级见表 1^[6]。

天然气正常燃烧时,扩展速度较低,正常条件下不会产生大的超压情况。当被引燃的蒸气云引起蒸发的天然气回烧到溢出源时,通常称作“燃烧火球”,如扩散时遇到严重的湍流,或者周围有阻碍物(例如密集的设备或者建筑物),或者遇到高压火源,就有可能出现燃烧速度加快的现象,从而产生较高压力乃至形成爆炸。

收稿日期:2015-10-13

基金项目:内蒙古 $200\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 天然气液化项目资助(Z 2014-6)

作者简介:谢顶杉(1983-),男,四川成都人,工程师,硕士,主要从事天然气净化与天然气液化设计工作。

表 1 热辐射在通常情况下的损害等级表

事故热通量 / (kW · m ⁻²)	损害类型
35 ~ 37.5	对工艺设备包括储罐、化工设备或者机器有损害
25	无明火时,点燃木头所需的最小能量值
18 ~ 20	塑料电缆的绝缘层暴露在外会退化
12.5 ~ 15	有明火时点燃木头所需的最小能量值,塑料管道融化值
5	员工在穿着合适工作服的情况下能紧急操作持续几分钟

注:事故热通量值基于平均暴露时间 10 min 计算得到。

2 计算模型选择

研究 LNG 发生池火火灾热辐射影响范围和影响因素,须结合相关理论知识和实际工程情况,有相关数学模型作为理论支撑。LNG 池火火灾的数学模型主要分为场模型和半经验模型两类。

场模型,即通过计算流体力学(CFD)模型,(如 FDS, FLUENT 等模型),求解 N-S 方程,并且结合描述火灾情况的物理、化学过程的子模型,对 LNG 火灾情况进行预测,它比传统经验模型具有更高的可信度,也是未来火灾数学模型的发展方向^[7-9]。但是场模型的缺点是需要专业技术人员分析,计算工作量大,不适宜一般工程技术人员使用^[1],因此不讨论此模型。

半经验模型,是基于过去火灾实验数据得到的经验公式,主要采用无因次方程关系式来描述火灾特点。这种模型具有相对简单、使用方便,预测结果比较合理等优点,因此该类模型在工程风险评价过程中使用广泛。因此,重点对常用的几种半经验模型进行介绍。

2.1 点源模型

点源模型^[10]的原理是根据牛顿提出的平方反比定律,即辐射强度与到辐射源距离的平方成反比。假设池火作为一个热辐射中心点,成半球状形式向周围空间辐射热量,表达式如下:

$$q = X \frac{(\pi/4) D^2 m H t}{4\pi l^2} \quad (1)$$

式中: q 为热辐射强度, kW/m²; X 为热辐射能的比率,无量纲; D 为储罐围堰直径, m; m 为质量燃烧速度, kg/(m² · s); H 为燃烧热, kJ/kg; t 为空气透射率; l 为下风向距离, m。

2.2 固体火焰模型

固体火焰模型的基本原理则是将没有规则的火焰形状假定为圆柱形,见图 1。圆柱的直径为发生池火的直径,当风速不为 0 m/s 时,圆柱体将发生倾斜,与竖直方向的夹角为 θ 。

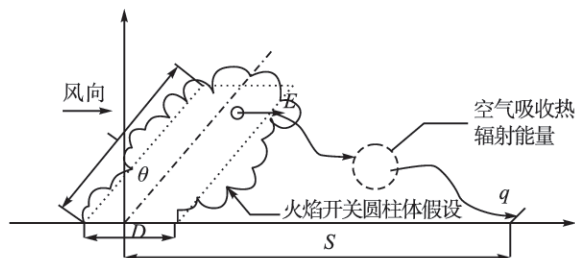


图 1 固体火焰模型图

计算公式:

$$q = \sum_{i=1}^n F_{dAi} - A_{obo} \left(\int E_{\lambda i} d\lambda \right) \tau_{\lambda dAi} \quad (2)$$

式中: q 为热辐射强度, kW/m²; F 为视角系数; 无量纲; A_i 为面积, m²; A_{obo} 为辐射接收物面积, m²; $E_{\lambda i}$ 为波长辐射强度; λ 为波长, m; E 为火焰表面辐射力, kW/m²。

为方便使用,对上述模型进行简化:

$$q = E \times \tau_s \times F_s \quad (3)$$

在具体使用过程中,固体火焰模型分为 LNG-Fire 3 和 PoFMISE 两种计算模型^[1]。

2.3 池火定量评价模型

因为池火火焰的对外热辐射过程实际为换热过程,对附近人员及设备的影响则体现在辐射的强度和辐射时间上^[2]。

池火的火焰高度计算公式:

$$H = 84 r \left[\frac{(dm/dt)}{\rho_a (2gr)^{0.5}} \right]^{0.6} \quad (4)$$

式中: H 为火焰高度, m; r 为发生池火的液池半径, m; ρ 为空气密度, kg/m³。

池火的总热流量公式:

$$Q = \frac{(\pi r^2 + 2\pi r H) (dm/dt) \eta H_c}{72 (dm/dt)^{0.61} + 1} \quad (5)$$

式中: η 为效率系数,通常取 0.13 ~ 0.35,一般取保守值 0.35。

距液池中心距离为 R (池外) 的热辐射强度 I 的计算公式:

$$I = TQ / (4\pi R^2) \quad (6)$$

式中: I 为热辐射强度, kW/m²; 空气的热传递系数 $T = 1 - 0.0581nR$; R 为距液池中心距离, m。

2.4 模型使用建议

通过以上模型分析可知,由于点源模型没有充分考虑大气条件等因素的影响,并且在预测结果上,出现小尺寸池火安全距离预测结果偏小,大尺寸池火安全距离预测结果偏大的情况,导致低估小尺寸池火的危害,但又高估大尺寸池火的危害。因此在工程上进行安全评价时,不推荐使用点源模型。

固体火焰模型中的 LNG-Fire 3 模型在使用中存在未

考虑表面辐射力随火焰高度的变化,也没有考虑 LNG 不完全燃烧的问题;PoFMISE 模型中系数主要来自 LPG 或油品火灾,LNG 池火火灾实验数据较少^[1]。因此,在对 LNG 进行定量分析时,不推荐使用固体火焰模型,推荐采用池火定量评价模型。

3 安全距离影响因素研究

PHAST 软件是挪威船级社推出的石化项目危害后果分析工具,是国内应用最普遍的定量风险分析软件,可用来分析物料泄漏情况,模拟液池的形成、扩散,计算火灾后果(包括喷射火、池火、闪火、VCE 和 BLEVE)等^[11-13]。

应用 DNV PHAST 软件进行池火火灾热辐射的分析研究,采用单因素法和池火定量评价模型,研究常见影响因素对池火火灾热辐射的影响程度、影响范围等。

3.1 环境风速

环境风速是影响大气湍流程度的重要因素之一。对于火灾热辐射,风速主要影响大气的湍流强度,湍流强度的大小影响空气的热传递系数 T 。从经验模型分析风速对热辐射影响可发现,当风速越大,火焰发展方向往下方向范围就越广,越倾向地面,导致高辐射强度的安全距离增加,但低辐射强度的安全距离降低或基本不变^[1,14],图 2 表示了环境风速对热辐射安全距离的影响,图 3 表示了当环境风速为 1 m/s 时,LNG 储罐破裂,发生池火时不同热辐射强度的影响范围。

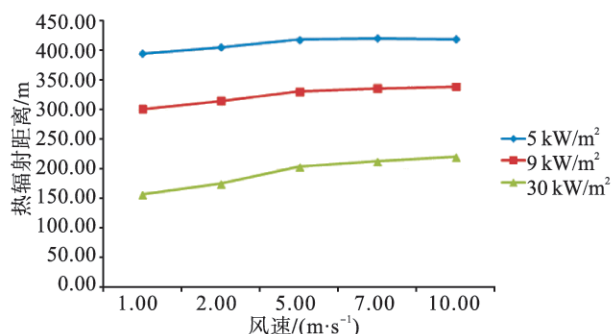


图2 环境风速对热辐射距离的影响

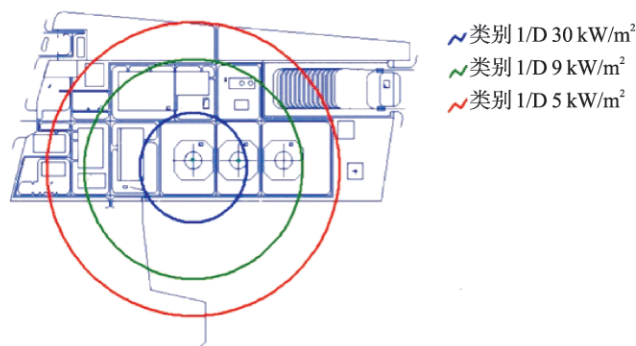


图3 LNG 储罐破裂发生池火的热辐射影响范围俯视图(1 m/s)

3.2 大气条件

大气稳定度是表征大气湍流程度的的一种半定量方法。大气稳定度不同,空气中物质的组成不同,空气的密度也会变化,导致燃烧中心的吸收衰减系数 k 不同。当池火发生在白天或夜间时,其平均光线长度校正系数有所区别。根据以上理论,表 2 给出了不同大气稳定度对热辐射距离的影响。

表2 大气稳定度对热辐射距离的影响

热辐射 / (kW·m ⁻²)	大气稳定度					
	A	B	C	D	E	F
5	26.3	26.55	26.82	27.29	27.18	27.29
9	21.69	21.89	22.11	22.28	22.38	22.46
30	13.1	13.24	13.39	13.08	13.55	13.58

注:热辐射影响距离为到 LNG 储罐中心的距离。大气稳定度等级一般分为 A~F 6 类,A 代表非常不稳定(白天),B 代表中等不稳定(白天),C 代表轻微不稳定(白天),D 代表中性(白天或夜间),E 代表稳定(夜间),F 代表非常稳定(夜间)^[15]。

通过模拟情况可以看出,大气稳定度对池火火灾热辐射的范围影响较小。

3.3 泄漏孔径

管道发生泄漏时孔径的大小会影响泄漏速率和泄漏量,泄漏速率是影响稳态情况下重气扩散的安全距离的最重要因素之一。重气扩散的情况则直接影响产生火灾热辐射的影响范围^[14,16]。泄漏量不同,则液池的半径 r 就不同,从而影响池火的燃烧强度、燃烧的持续时间。因此,研究了不同泄漏孔径对热辐射距离的影响,见表 3。

表3 泄漏孔径对热辐射距离的影响

热辐射 / (kW·m ⁻²)	不同泄漏孔径的热辐射距离 /m					
	5mm	25mm	50mm	100mm	200mm	完全破裂
5	4.11	27.29	82.68	192.29	370.03	673.44
9	3.6	22.46	65.7	151.16	289.1	525.31
30	-	13.58	38.83	86.85	164.21	298.84

注:热辐射影响距离为到 LNG 储罐中心的距离。

从表 3 可看出,泄漏孔径的大小对池火火灾热辐射的影响非常明显。这是因为孔径的大小,直接影响泄漏量,孔洞越大,泄漏物资越多,危险区域越大。因此,在实际工程项目中,要密切监视储罐和管道泄漏情况。

3.4 围堰尺寸

根据 GB 50183-2004《石油天然气工程设计防火规范》10.3.5.3 中第三条的规定:储罐液位以下配有内置关闭阀的围堰区,设计泄漏量应按照假设敞开流动及流通面积等于液位以下接管管口面积,储罐充满时持续流

出时间1 h的最大量考虑。可见LNG储罐周围通常要设计围堰,以防止储罐发生泄漏时,液体四处流淌蔓延造成二次伤害。如发生火灾,还可以防止火焰蔓延到周边地区^[17-19]。因此,围堰的大小直接影响液池的大小,进而影响池火的火焰高度 H 。因此,研究当围堰形式为正六边形,其容积保持不变时,围堰尺寸对热辐射距离的影响半径,见表4。

表4 围堰尺寸对热辐射距离的影响半径

热辐射 / (kW·m ⁻²)	不同围堰尺寸(a, h)对热辐射距离的影响半径/m					
	不设置	(62, 0.5)	(43, 1)	(36, 1.5)	(31, 2)	(27, 2.5)
5	27.29	22.34	18.75	17.79	16.88	15.13
9	22.46	19.74	17.69	16.36	15.74	14.88
30	13.58	12.09	10.95	10.57	9.96	9.26

注:热辐射影响距离为到LNG储罐中心的距离; a 为正六边形边长, m; h 为围堰高度, m。

由表4可看出,围堰尺寸对池火火灾热辐射的范围有一定影响,并且随着围堰高度的增加,火灾热辐射的影响范围逐渐减小。但随着围堰高度的增加,其减小的幅度降低,这是因为池火火灾的发生点在液池内,而液池一般在地面以下,且液池中LNG的量较少,产生的池火火焰高度不会太高。因此,在工程实际项目中,需结合建设成本和安全距离的要求,选择合适的围堰高度,不一定以提高围堰的高度来保障安全距离^[20]。

4 结论

1) 风速和泄漏孔径的大小对池火火灾热辐射的影响较大,其中泄漏孔径的大小影响最大。因此,在实际工程项目中,要密切关注发生LNG泄漏量的大小。

2) 大气稳定度对池火火灾热辐射的影响范围较小。这是因为大气稳定度主要影响的是LNG泄漏扩散范围,而池火火灾的发生在LNG泄漏扩散完成后,因此大气稳定度的影响较小。

3) 围堰尺寸对池火火灾热辐射半径有影响,但过高的围堰尺寸会增加建设成本。因此,在工程中,需结合工程安全距离要求和建设成本共同确定围堰的高度。

参考文献:

[1] 孙 标,郭开华. LNG池火热辐射模型及安全距离影响因素研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(9): 51-55.
Sun Biao, Guo Kaihua. Research on the Thermal Radiation Models for LNG Pool Fire and Its Influencing Factors on Safety Distance [J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(9): 51-55.

[2] 马小明,吴晓曦. LNG储罐火灾后果分析[J]. 中山大学学报论丛, 2007, 27(2): 105-108.
Ma Xiaoming, Wu Xiaoxi. Fire Effect Analysis of LNG Storage Tank [J]. Sun Yat-sen University Forum, 2007, 27(2): 105-108.

[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, 2006, 27(1): 131-133.
Zhou Yanbo, Huang Jun, Lu Jun. Security Analysis on LNG Leakage and Diffusion [J]. Natural Gas Industry, 2006, 27(1): 131-133.

[4] 朱建华,褚家成. 池火特性参数计算及其热辐射危害评价[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(6): 25-28.
Zhu Jianhua, Chu Jiacheng. Calculation of Pool Fire Characteristic Parameters and Evaluation of Heat Radiation Hazard [J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(6): 25-28.

[5] National Fire Protection Association. Standard for Production, Storage and Handling of LNG [M]. 2009 Edition. Quincy: MA An International Codes and Standards Organization, 2008: 49-55.

[6] Barry, Thomas. Risk-informed Performance Based Industrial Fire Protection [M]. Washington: Tennessee Valley Publishing, 2002: 150-168.

[7] 黄 琴,蒋军成. 液化天然气泄漏扩散模型比较[J]. 中国安全生产科学技术, 2007, 3(5): 3-6.
Huang Qin, Jiang Juncheng. Comparisons for LNG Dispersion Models [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2007, 3(5): 3-6.

[8] Ermak DL. User's Manual for SLAB: An Atmospheric Dispersion Model for Denser-Than-Air-Releases [R]. U S: Lawrence Livermore National Laboratory, 1990.

[9] 冯志华. 危险气体事故性泄漏扩散的理论和实验研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2006.
Feng Zhihua. Theoretical and Experimental Study on the Leakage and Diffusion of Hazardous Gas [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2006.

[10] P. K. Raj. NFPA 59A Vapor Dispersion and Thermal Radiation Models in the Light of New Data [R]. NC: A-GA-NFPA 59A Standards Workshop Charlotte, 2006: 10.

[11] 张文冬,张永信. 基于PHAST软件模拟大型LNG储罐泄漏事故[J]. 石油化工安全环保技术, 2014, 30(5): 27-31.
Zhang Wendong, Zhang Yongxin. Simulation of Leakage Accident of Large LNG Storage Tank Based on PHAST Software [J]. Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology, 2014, 30(5): 27-31.

[12] 周玉希,蔡治勇. 基于PHAST软件的LNG储配站储罐泄漏扩散分析[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2013, 15(增刊): 12-16.

- Zhou Yuxi, Cai Zhiyong. The Analysis of LNG Storage and Distribution Station Tank Leakage and Diffusion Based PHAST [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 15 (Suppl): 12-16.
- [13] 劳敏. 基于 PHAST 软件的 CNG 加气站安全评价[J]. 科技传播, 2012, (3): 218-219.
- Lao Min. Safety Evaluation of CNG Filling Station Based on PHAST Software [J]. Public Communication of Science & Technology, 2012, (3): 218-219.
- [14] 朱伯龄, 於孝春. PHAST 软件对液化天然气泄漏扩散的研究[J]. 计算机与应用化学, 2009, 26(11): 1418-1422.
- Zhu Boling, Yu Xiaochun. Research for Phast in the Process of Liquefied Natural Gas Discharge and Dispersion [J]. Computer and Applied Chemistry, 2009, 26(11): 1418-1422.
- [15] 潘旭海, 华敏, 蒋军成. 环境条件对 LNG 泄漏扩散影响的模拟研究[J]. 天然气工业, 2009, 29(1): 117-119.
- Pan Xuhai, Hua Min, Jiang Juncheng. Simulation Research on the Influence of Environmental Condition on LNG Leakage and Dispersion [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(1): 117-119.
- [16] 朱伯龄, 於孝春. LNG 储罐孔洞泄漏扩散危险区域分析[J]. 安全与环境工程, 2009, 16(3): 104-108.
- Zhu Boling, Yu Xiaochun. Analysis of the Dangerous Area Caused by Hole Leak and Dispersion in LNG Tank [J]. Safety and Environmental Engineering, 2009, 16(3): 104-108.
- [17] 要栋梁. LNG 储罐事故模拟分析[J]. 化工管理, 2014, (8): 49-50.
- Yao Dongliang. The Accident Simulation Analysis of LNG Tank [J]. Chemical Enterprise Management, 2014, (8): 49-50.
- [18] 刘隆, 孟波, 王启. 围堰对 LNG 储罐泄漏扩散规律影响研究[J]. 新技术新工艺, 2014, (12): 115-118.
- Liu Long, Meng Bo, Wang Qi. Research on Influences of Dike Dam on the Law of LNG Release and Dispersion [J]. New Technology & New Process, 2014, (12): 115-118.
- [19] 吴运逸. 防护堤对 LNG 扩散的抑制作用[J]. 油气储运, 2014, 33(11): 1254-1258.
- Wu Yunyi. Inhibitory Effect of Fending Groin on LNG Diffusion [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(11): 1254-1258.
- [20] Koopman R P, Ernak D L. Lessons Learned from LNG Safety Research [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 140(3): 412-418.

长输管道中外技术标准差异分析研讨会在京召开

2016年4月14~15日, 中亚天然气管道公司主办的“长输管道中外技术标准差异分析研讨会”在京召开。会议围绕“长输管道中外技术标准差异”展开热烈分析研讨。来自国际管道研究协会、加拿大能源局、ASME、中国石油大学、中国石油天然气集团公司等26位海内外行业专家做专题报告, 近百位行业代表参加研讨会。

与会代表认为, 科学高效的标准化管理体制和运行机制更为重要。国外管道企业标准体系建设具有科学性、先进性和国际性, 我国还有一定距离。国际对标要厘清标准背后的理念、原则和技术差异, 充分结合我国实际。建议我国在修订标准时, 在技术规定各环节上考虑相互间的承接性和系统性。在国外的工程项目, 策划时就与所在国政府协商确认技术标准清单。

(兰洁 摘自中国石油新闻中心网)