

# 液化天然气泄漏与扩散的安全性分析

周彦波 黄俊 鲁军

(华东理工大学·上海)

周彦波等.液化天然气泄漏与扩散的安全性分析.天然气工业,2007,27(1):131-133.

**摘要** 能源供应紧张的现状,使得我国的LNG进口量快速增长,LNG接收终端和港口设备可能发生LNG溢出的危险性及破坏性也备受关注。为此,介绍了我国LNG进口和终端建设情况,结合国内外LNG泄漏与扩散的试验和模拟,对可能发生的LNG船舶碰撞危害性、LNG泄露的扩散和火灾危险性等方面研究进行了综述和分析,并对其中的不确定性问题进行了讨论,给出了进行LNG风险评价的建议。

**关键词** 液化天然气 终端 泄露 扩散 风险 评价 安全性 建议

我国目前已在珠江三角洲、长江三角洲和福建开始建设LNG项目<sup>[1]</sup>,可以预见,未来数年内,LNG在我国将被广泛应用于工业和民用的各个领域。

LNG接收终端码头基本都设置在工业发达、人口密集的沿海地区,天然气需求的不断增长使LNG运输船舶的数量、航行往来次数以及运输数量不断增加,出现意外溢出的可能性也随之增大,对周围工业及居民的危险性也相应增加。自美国“9·11”事件后,人们对危险品或可燃货物的侵袭可能对公众和财产安全造成的伤害越来越关注。因此,从公众财产安全以及地区、能源可靠性的角度来看,对LNG泄漏危害性进行分析,制定并采取确保LNG接收站和LNG运输安全可靠的措施非常必要。

以LNG溢出有可能降低运输船舶的结构完整性并损坏其他设备。

LNG气化与空气形成爆炸性混合物,爆炸下限为3.6%~6.5%(体积分数,下同),爆炸上限为13%~17%,其火灾的爆炸危险性大,火焰温度高、辐射热强,最大爆炸压力0.68 MPa,易形成大面积火灾。一般来说,气体的燃烧和爆炸可产生热负荷和压力负荷。通常用火灾所造成的热辐射损害的等级来建立火灾危险区。对于热负荷,美国国家防火协会推荐用5 kW/m<sup>2</sup>的热通量值来制定人员的防火距离。在此范围内,穿着适当工作服的人员紧急操作持续几分钟时而不造成伤害<sup>[2]</sup>。火灾热辐射不同损害的等级显示在表1中。

表1 热辐射在通常情况下的损害等级表<sup>[4]</sup>

事故热通量 (kW/m <sup>2</sup> )	损害类型
35~37.5	对于工艺设备包括钢罐、化学工艺设备,或者机器的损害
25	在无明火和不确定长期暴露的情况下点燃木头所需要的最小能量
18~20	暴露的塑料电缆绝缘层退化
12.5~15	有明火时点燃木头所需要的最小能量;融化塑料管道
5	允许员工在穿着适当工作服的情况下紧急操作持续几分钟

注:事故热通量值基于平均暴露时间为10 min。

## 一、LNG 溢出后的潜在危害性分析

### 1. LNG 漏泄的主要危害性

甲烷是一种低毒性的窒息性气体。大量LNG从LNG货舱的破损口溢出后开始气化。如果没有遇到点火源,则空气中甲烷的浓度可能会非常高,从而对船上的船员、应急人员或者其他可能暴露于正在膨胀扩散的LNG气团中的人员造成窒息危害。而且超低温的LNG可能会对溢出区域附近的人员和设备产生威胁。液态LNG接触到皮肤会造成低温灼伤。同时低温LNG可能对于钢结构和一般船舶的结构连接件,如焊接等具有破坏性的影响。所

**作者简介:**周彦波,1982年生,博士研究生;从事能源安全与环保技术研究。地址:(200237)上海市华东理工大学资源与环境工程学院。电话:(021)64253366。E-mail:hezi001007@163.com

天然气燃烧通常以较低的速度扩展,在正常条件下不会产生大的超压。被引燃的蒸气云将引起蒸气回烧到溢出源,这通常被称作“燃烧火球”,通常它产生相对较低的压力,因而对建筑物造成压力损害相对较低。但在某些条件下如蒸气云流动扩散时湍流严重,或者周围遇到了阻碍,或者遇到了高压火源,燃烧速度就可能会出现快速加速<sup>[3]</sup>,从而导致超压。

再者应该考虑 LNG 快速相变的危害。当较热液体和较冷液体之间的温差足以驱动冷液体迅速达到其过热极限的时候,就会出现快速相变,从而引起冷液体自发的快速沸腾。当低温的 LNG 和一种热液体(比如水)接触而被突然加热的时候,就可能出现 LNG 的快速沸腾气化现象,导致局部超压释放。这种现象的影响将会局限在溢出源附近,会对设备和构筑物造成广泛的损害。

## 2. 船舶碰撞损坏分析

目前,对于运输船舱意外损坏引起 LNG 扩散以及溢出扩散的危险性,都仅仅是一般性的推理分析。因为 LNG 运输船舶设计和目前 LNG 运输安全管理的结合,已经使 LNG 发生意外的可能性降低到了非常低的程度<sup>[5]</sup>。在过去的 40 多年中关于损坏或溢出的历史记录和信息都很少见。其良好的安全记录,很大程度上得益于 LNG 船的双层结构<sup>[6]</sup>。目前很多使用中的 LNG 气轮都采用 Moss 球形舱。除了 Moss 气舱外,其他 LNG 气轮都设计成棱形的、衬有隔膜的气舱。

根据与 LNG 船舶相似的双层船壳油轮撞击的有限元模型,Ammerman<sup>[7]</sup>估计出船损坏的程度和撞击孔径的大小。碰撞事故所造成损坏的严重程度取决于撞击部位、船舶的相对速度和撞击相对位置和采取的缓冲或预防系统等。由于 LNG 船舶中附加了隔离层和三级保护壳,因此要有很深的穿透才能造成 LNG 船舱损坏。Ammerman 指出,只有当大型气轮的撞击速度超过 5~6 节的时候,被撞气轮的内舱壳才会被撞穿。对于游艇一类的小型船只,其动能通常不足以穿透双层船壳气轮的内舱壳。而且双层船壳的被穿透的时候,穿透的长度必须达到 3 m 左右,内舱壳上才会被撞出缺口。

## 3. 意外溢出的蒸气扩散危险性分析

LNG 泄漏时时,起初会发生猛烈沸腾蒸发,随后蒸发率将迅速衰减至一个固定值,蒸气沿地面形成一个层流,从环境中吸收热量并逐渐上升和扩散,同时将周围的空气冷却至露点以下,形成一个可见云团。

由于在大多数事故中存在点火源的可能性很高,所以意外溢出产生的热危险基本表现为 LNG 冷液池着火<sup>[8]</sup>。室外的液池火灾,因为氧气供应充足,燃烧较完全,产生的有毒、有害气体易扩散,热辐射是其主要危害。而当没有点火源时,溢出的 LNG 可能会形成蒸气云。蒸气云团扩散是一个复杂的问题,具体范围取决于溢出位置和现场气象条件。风和湍流是决定蒸气扩散稀释的最直接原因,风速越大,湍流越强,蒸气的扩散速度越快,气体浓度就越低,危险消除的就快。美国桑地亚实验室选择了距地面上 10 m 处 2.33 m/s 的风速和 F 稳定度的气象条件进行模拟<sup>[9]</sup>,获得了蒸气扩散的爆炸下限距离。在假设损坏船舱的泄漏孔面积 1 m<sup>2</sup> 溢出 40 min 后,可以形成直径为 148 m<sup>2</sup> 的液池,扩散到爆炸下限的距离为 1536 m。当泄漏孔面积 2 m<sup>2</sup> 时,仅 20 min 后,爆炸下限的距离既到达 1710 m。王大庆等人<sup>[10]</sup>利用高斯扩散模型,分别绘出了假设情况下天然气连续扩散和瞬时扩散的等浓度图。连续低强度泄漏时,在相同的泄漏口径下,风速越大越有利于扩散,危害区域就越小,如穿孔泄漏直径同为 100 mm,风速为 1 m/s 和 5 m/s 的爆炸下限距离分别为 400 m 和 150 m。而高强度的瞬时泄漏情况有所不同,大规模泄漏 3 min 后,风速分别为 1 m/s 和 5 m/s 时,气体扩散达到最低爆炸极限的距离保守估计为 225 m 和 1000 m。即在泄漏初期,泄露所造成的危险区域随着时间延长和风速加大而扩大,时间再延长,气体浓度降低,表现出的规律类似于低强度泄漏。

基于国内外对 LNG 泄露模拟得出的结果和气体扩散试验,大型溢出所产生的蒸气云的扩散可能会超过 1000 m。扩散范围的计算与所选择的模型,大气条件,泄露源强等因素都有关系,如果发生 LNG 蒸气扩散应当充分评估对于人身和财产安全的危险等级和潜在区域,采取危险减轻措施,开展快速引燃扩散云团和阻止溢出的步骤。

## 4. 意外溢出的火灾危险性分析

LNG 外溢蒸气遇到点火源时,产生的火焰以两种方式传播:一种是以预混合的发微弱光的火焰传播,从着火点顺风向传播;另一种是以发光的弥散火焰传播,逆风向移动,蔓延通过云层中燃料富集的部分,逐渐回烧到泄漏点。国内外进行了一批池火灾试验和计算机模拟,测得了一些 LNG 泄漏在水面上形成的池火的数据和火灾发生时的热辐射数据。桑地亚实验室利用标称火焰模型来计算<sup>[9]</sup>,意外损坏情况发生的火灾引起的预期热危险距离列于表 2。

表 2 火灾热强度距离的敏感性分析表

泄露尺寸 (m <sup>2</sup> )	损坏的船舱数 (个)	流量系数	燃烧速度 (m/s)	表面能量发射率 (kW/m <sup>2</sup> )	液池直径 (m)	燃烧时间 (min)	到 37.5 kW/m <sup>2</sup> 距离 (m)
1	1	0.6	3×10 <sup>-4</sup>	220	148	40	177
2	1	0.6	3×10 <sup>-4</sup>	220	209	20	250
2	3	0.6	3×10 <sup>-4</sup>	220	362	20	398

结果显示,一次 LNG 气舱的意外损坏,其孔尺寸在 1 m<sup>2</sup> 时,其潜在火灾热强度为 37.5 kW/m<sup>2</sup> 时的热辐射危险距离溢出中心为 177 m。当船体同时有 3 处受损坏,孔尺寸为 2 m<sup>2</sup> 的情况下,其燃烧的热辐射危险距离估算将达到 398 m。

## 二、LNG 泄漏危害评价与模拟中的不确定性

对泄漏事故进行风险评价,是减少事故危害性的一项重要措施。由于 LNG 的泄漏、扩散以及造成的火灾、爆炸和中毒事故等方面都存在极大的不确定性,给实际的管理和预测造成了很大困难<sup>[1]</sup>。LNG 泄漏与扩散问题中主要不确定性因素如下。

(1) LNG 泄漏源位置与发生泄漏的概率的不确定性

LNG 从生产地到最终用户的运输过程中,经过许多装置和管线。在海洋运输船和接受装置甚至再气化过程都有可能发生泄漏,但这种泄露的概率是不能确定的。一般都是通过有经验的工程师利用其积累的知识与经验来进行评价。

(2) 泄漏与扩散模式的不确定性

对于危险性气体泄漏和扩散,国内外科研者都依据很多模式来进行研究,例如高斯模型、BM 模型和 FEM3 模型等。但这些模式中都采用了大量的数学假设,由于假设条件与实际情况可能不符,所建立的模式势必有些不确定性。此外,模式中许多参数的选取也具有不确定性,例如对模式影响较大的气象因素,因为所采用的气象历史资料与实际状况的差异,也造成了评价和预测的不确定性。

## 三、结 论

(1) LNG 船舶设计中附加隔离层和三级保护壳,要造成类似油轮撞击造成相同的孔尺寸,其撞击速度要比撞击油轮高一到两节的速度。对于小型船只其动能通常不足以撞穿一艘 LNG 船壳。LNG 运输船舶的结构设计具有防撞击、防泄漏和具有安全

可靠性。

(2) LNG 意外溢出时具有较高的蒸气扩散和火灾危险性。溢出蒸气扩散达到最低爆炸极限的距离保守估计为 1600 m 左右。一次 LNG 气舱的意外损坏,其孔尺寸在 1 m<sup>2</sup> 时,其潜在火灾能源密度为 37.5 kW/m<sup>2</sup> 时的热危险在距离溢出中心为 177 m。船体同时有三处受损坏,孔尺寸为 2 m<sup>2</sup> 的情况下,其燃烧的热危险距离估算将达到 398 m。

(3) LNG 泄漏与扩散的风险评价中存在很多不确定性问题,需要在模式的选择、危害区域确定和救灾应急措施过程中充分考虑。

## 参 考 文 献

- [1] 赵淑君,朱万美,王丽娟.LNG 的应用与气化站设计的探讨[J].煤气与热力,2005,25(8):36-38.
- [2] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. Standard 59A, Standard for the protection, storage, and handling of liquefied natural gas[M].2001 Edition, Quincy, MA.
- [3] BENEDICK W B, TIESZEN S R, SHERMAN M P. Flame acceleration and transition to detonation in channels[M]. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories, 1987.
- [4] BARRY, THOMAS. Risk-informed performance-based industrial fire protection[M]. Tennessee Valley Publishing, 2002.
- [5] DELANO, FISOYE et al. Introduction to LNG[M]// University of Houston Law Center, Institute for Energy, Houston. TX: Law and Enterprise, 2003.
- [6] JUCKETT DON. Properties of LNG[M]// U S Department of Energy. Solomons, MD: LNG Workshop, 2002.
- [7] AMMERMAN D. Marine Safety Systems, Control Ballast Tanker Interactive CD[M]. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories, 2002.
- [8] 王志荣,蒋军成,姜慧.室外池火灾火焰环境研究进展[J].石油与天然气化工,2005,34(4):321-324.
- [9] MIKE HIGHTOWER, LOUIS GRITZO, et al. Guidance on risk analysis and safety implications of a large liquefied natural gas (LNG) spill over water[M]. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories, 2004.
- [10] 王大庆,高惠临.天然气管线泄漏扩散及危害区域分析[J].天然气工业,2006,26(7):120-122.
- [11] 沈裴敏,伍良.燃气泄漏风险评价中不确定性问题的探讨[J].中国安全科学学报,2002,12(1):30-33.

(修改回稿日期 2006-12-03 编辑 居维清)