

综述与专论

# 液化天然气场站安全技术标准规范及发展动态

皇甫立霞, 郭开华

(中山大学工学院, 广东 广州 510275)

**摘要:** 通过分析液化天然气 (LNG) 场站危险性和安全问题, 结合近几年跟踪国内外与 LNG 场站设置密切相关的安全技术标准规范和更新情况, 根据 NFPA 59A 的最新修订版的更新内容, 分析全球 LNG 安全性标准的发展态势, 对完善我国 LNG 标准体系和相关标准的制修订, 推动我国 LNG 产业健康安全有序地发展, 与国际 LNG 接轨有着重要的意义。

**关键词:** 液化天然气; 场站; 安全技术; 标准; 规范

**中图分类号:** TE 0

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0438-1157 (2009) S1-011-05

## Current issues and development for LNG plant safety standards

HUANGPU Lixia, GUO Kaihua

(School of Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China)

**Abstract:** The LNG hazards and the safety issues on LNG plants are discussed. The trends on the development and upgrade of the LNG safety standards and codes are reviewed according to the latest study on the world-wide LNG standards and code and following up the recent revision activity on NFPA 59A. The safety issues are essential for the LNG industry development and this study will provide a practical and effective guidance for the improvement and upgrade of the China national LNG standard system, and is benefit to the healthy and orderly development of the national LNG industry as well as its coordination with the international LNG society.

**Key words:** LNG; plant; safety; standard; code

### 引 言

自 1964 年全球首次出现 LNG 贸易以来, 为保证 LNG 产业健康、安全、稳定发展, 适应其产业发展和市场需求, 各国都十分重视 LNG 标准化的建设工作, 围绕 LNG 产品性质、安全消防、材料、设备设施以及计量等方面制定了相应的技术标准和法律法规<sup>[1-2]</sup>。中国作为进口 LNG 的国家, 在 LNG 的开发和利用过程中, 应注意 LNG 产业链各个环节中 (LNG 工厂、LNG 接收终端、LNG 运输方面) 均有配套的国际运作规范和相应的技术标

准要求。我国 LNG 产业发展起步较晚, LNG 标准化建设工作处于发展阶段, 虽然已制定了一些相关的 LNG 标准与规范<sup>[3-5]</sup>, 但尚难以满足 LNG 产业发展和业务开拓的需要, 尤其是涉及 LNG 安全技术方面的要求, 现有的标准或规范存在着矛盾和差异。目前, 我国国家和行业颁布的 LNG 相关标准均是在借鉴国际和国外相关标准的基础上制修订的, 因此跟踪、分析和研究这些标准的制修订程序和更新动态极为重要。

LNG 作为液态深冷轻烃, 在大气中具有快速蒸发、扩散和可燃 [5% (LFL)~15% (HFL)]

2009-12-21 收到初稿, 2009-12-28 收到修改稿。

**联系人及第一作者:** 皇甫立霞 (1960—), 女, 副教授。

**基金项目:** 中山大学-BP 液化天然气中心项目 (99103-9390001);

广东省教育厅液化天然气低温技术重点实验室项目 (39000-3211101)。

**Received date:** 2009-12-21.

**Corresponding author:** HUANGPU Lixia, huangpulichia99@126.com

特性, LNG 场站在选址、设计、建造和运行管理等方面均有相应的安全技术标准和规范, LNG 安全风险评估和规避应遵循这些安全技术标准。近几年, 随着 LNG 工程技术的不断进步, 各国对 LNG 生产和储运过程的安全技术标准的更新越来越重视, 都在及时地修订更新各自的相关标准。美国消防协会 (NFPA) 是一个国际性的非盈利组织, 作为消防业的先导, 其制定的标准 (如 LNG 产业的 NFPA 59A) 在国际上得到了广泛采用, 具有较高的权威性, 随着 LNG 产业发展和技术的进步, 为使 NFPA 59A 标准更加完善和实用, 美国消防协会技术委员会已完成了 NFPA 59A—2006 的修订, 于 2009 年发布新版。目前我国颁布的 GB/T 20368—2006 是等同采用 NFPA 59A—2001 版本<sup>[6]</sup>, 与目前的 NFPA 59A—2009 相差两个版本。本文通过分析 LNG 场站危险性和安全问题, 结合近几年跟踪国内外与 LNG 场站设置密切相关的安全技术标准规范和更新情况, 根据 NFPA 59A—2009 的最新修订版更新内容, 分析全球 LNG 安全性标准的发展态势, 对完善我国 LNG 标准体系和相关标准的制修订, 推动我国 LNG 产业健康、安全、有序地发展, 与国际 LNG 接轨有着重要的意义。

## 1 LNG 场站需要考量的安全因素

由于气源组分和生产工艺不同, 不同 LNG 工厂生产的 LNG 具有不同的组分, 但 LNG 主要成分是甲烷, 另外含有少量的乙烷、丙烷、氮气等。

### 1.1 LNG 危险性

LNG 作为液态深冷轻烃 ( $-162^{\circ}\text{C}$ ) 的特殊商品, 其危险性主要来自储运过程中的沸腾与翻滚、泄漏引起的低温冻伤、麻醉、窒息以及可能引起的火灾。在 LNG 生产、储存、装运和接收的过程中, 由于运行操作不当、设备故障及自然或人为因素等, 有可能导致 LNG 储罐、管路和连接部件处发生 LNG 的泄漏。LNG 泄漏流至地面或水面蔓延时, 由于大量吸收环境热量, 会剧烈沸腾和蒸发, 蒸发气体沿地面形成一个扩散流层, 与大气混合至下游。蒸发气从环境中吸收热量逐渐扩散的同时还将周围环境空气冷却至露点以下, 形成可见的蒸气云团移动。在讨论蒸气云团扩散危害问题时, 通常采用一定的计算模型来确定蒸气云扩散范围 (安全距离)。若蒸气云前端被点燃, 火焰将快速向泄漏源 (浓度高) 方向

回烧, 当前端浓度大于 15% 时, 有可能短时烧向下游, 阻挡物可使火焰回卷。当“大量”高浓度蒸气云团被点燃时可能形成“火球”, 但维持时间很短 (几秒钟), 一般不会有加速爆炸燃烧, 因为形成的压力波强度较小 (mbar 级)。燃烧速率与泄漏量和大气条件等因素有关, 火焰内部热通量为  $150\sim 340\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ , 火焰表面辐射强度为  $220\sim 280\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 。通常通过热辐射强度来计算确定 LNG 火灾的危害范围 (安全距离)。

### 1.2 LNG 场站主要安全设施

在 LNG 场站中, 储罐是用来集中存储大量 LNG 的设施, 目前国内外均认为 LNG 储罐或储罐区是最大的危险源和安全防护区。LNG 场站使用的储罐为全容罐或双容罐, 其安全性较高, 对小型金属罐或单容罐则应在储罐 (区) 设置围堰, 即 LNG 拦蓄区, 以防止溢出或泄漏的 LNG 外流而可能引发的大面积火灾和爆炸等恶性事故。由于低温 LNG 会使金属部件出现明显的收缩, 可能导致 LNG 在阀门、法兰、管件、密封及裂缝等处发生泄漏, 因此需要有相应的 LNG 引流和储液池设置, 以防止低温 LNG 的外延和密度大于空气的 LNG 蒸气大量扩散。

由于 LNG 储罐、管路、管件、阀门等泄漏可引起低温蒸气扩散和火灾事故, 危害他人生命和设备安全, 因此对其要高度重视, 应对各种事故进行危险性分析、对工艺装置要采取安全设计和防护措施, 使之符合 LNG 场站建设和运行的安全性标准和规范要求。目前国际 LNG 项目和装备对其设计、施工、运行和管理均有较严格的规定, 使 LNG 产业在几十年的发展历史中, 一直保持着比汽油和 LPG 更为良好的安全记录。

## 2 LNG 场站设施安全标准规范

在 LNG 场站选址、设计、建造和运行管理中遵循相关的安全性标准是规避 LNG 安全风险的关键点之一。国内外标准对于 LNG 场站设置的安全性要求主要涉及如下几方面: ① LNG 溢出或泄漏的防护性要求, 要对 LNG 拦蓄区、引流及储液池等的设置和技术要求进行规范; ② 设定安全距离的要求, 主要包括储罐间的距离、储罐区内相邻设施和工作场所间的距离, 场内 LNG 设施与站外相邻的生活、工作和各种活动场所的距离要求; ③ 消防安全和防火设施的要求, 如高密度泡沫发生器、消

防栓和水幕设备以及干粉灭火器等设置要求。

## 2.1 LNG 场站设置安全标准规范

LNG 场站在选址、设置、设计和安全评估时，常采用的国内外主要标准有：美国防火协会标准，NFPA 59A《LNG 生产、储存和装运》；欧洲标准，EN 1473《LNG 设备与安装：陆上装置设计》；日本标准与规范，高压天然气保安法《液化气体设备规定（Note 1）》；中国标准与规范，GB 50183《石油天然气工程设计防火规范（第 10 章 LNG 站场）》；GB 50028《城镇燃气设计规范（第 9 章 LNG 供应）》；GB/T 20368《LNG 生产储存和装运》（等同采用 NFPA 59A—2001）。

## 2.2 欧洲、美国、日本和中国相关标准对比

近年来，人们对安全距离的确定最为关注，各标准对 LNG 场站的安全距离确定原则也不尽相同。如美国标准（NFPA 59A）对安全距离的确定是依据最大可能危险的影响范围作为确定安全距离的依据，即只针对储罐或 LNG 拦蓄区的最大火焰（池火）热辐射危害性和 LNG 泄漏蒸发形成蒸气云扩散两类危险。欧洲标准（EN 1473）是依据危险性评估（hazard assessment）来评价 LNG 站址布局设计是否可以接受，而不是仅仅核定所谓“安全距离”，该标准要求危险性评估要贯穿场站选址、设计、工程采购和施工以及运行等全过程，EN 1473 对 LNG 陆上装置设计的危险性评估有具体的规定原则。日本标准高压天然气保安法（The High Pressure Gas Safety Law）基于液化气体设备规定（Note 1），对储罐的安全距离也进行了规定，但计算公式是以爆破冲击波的强度为科学依据，即以储罐爆破冲击危害的影响范围作为安全距离核定的依据，这种定标思路应当是从 LPG 安全规范延伸而来。中国标准 GB 50183 和 GB 50028 对于小型储罐的安全距离都是由 LPG 规范延伸而来，而对于大型 LNG 储罐的相关安全距离尚缺乏科学合理的确定方法。

## 3 NFPA 59A 标准最新发展动态

### 3.1 NFPA 59A 修订程序

随着 LNG 产业发展和技术的进步，为使 NFPA 59A 标准更加完善和实用，美国消防协会从 2007 年开始对 NFPA 59A—2006 进行修订征求意见工作，于 2008 年底结束，2009 年发布新版。按照惯例美国消防协会在推出标准最新版本之前，

会征集各方专家、学者对前一版的修订建议。这些建议经美国消防协会液化天然气技术委员会（以下简称“委员会”）审议和汇总形成一份修订建议报告 ROP（Report on Proposals），并将其公开发布，供公众评论和注释；然后委员会将公众对 ROP 的评论和注释进行汇总，形成一份修订建议报告 ROC（Report on Comments），与技术委员会委员一起对 ROP 和 ROC 进行审议，将形成的“审定的修订案”文件在委员会年度报告会议上进行逐项表决，表决结果将以报告的形式提交给美国消防协会标准理事会。

2007 年 8 月，美国消防协会已将征集的相关专家学者的修改建议形成了 NFPA 59A-A2008-ROP 建议报告并对外公示<sup>[7]</sup>。2008 年 4 月又将公众对 ROP 的评论和注释进行汇总形成了一份修订评议报告 ROC<sup>[8]</sup>。这两份报告体现了美国消防协会技术委员会委员们对该标准中最新修订意见的讨论和评价，其中对《厂址和平面布局》一章的安全性条款的评价和讨论最为激烈，有关专家也对安全距离确定的方法和技术规范提出质疑并进行深入的讨论，提出修订意见，由于经过充分的科学评估，使得该标准的修订内容更具有科学性和实用性，使得该标准的采用者能够更加适应当前国际 LNG 产业发展和公众对 LNG 项目设立的关注和风险知情权的要求，也使得美国标准 NFPA 59A 与国际上同行的欧洲标准 EN 1473 更趋一致。这说明国际上典型的自我约束性标准也在向 LNG 场站危险性评估模式转变。

### 3.2 NFPA 59A—2009 主要修订内容

NFPA 59A—2009 修改的内容主要在以下几个方面。

3.2.1 关于储罐拦蓄区最小容积的规定 对储罐拦蓄区最小容积规定修改的内容与原来标准的规定内容比对见表 1。

3.2.2 关于 LNG 热辐射计算模型 对原标准的热辐射距离计算的简单模型（即点源模型）已被删除。其原因有二：一是点源模型没有考虑风速和大气相对湿度的变化；二是如果考虑火灾时烟雾的影响，用点源模型计算出来的热辐射距离在火灾直径较小和较大时均有明显的误差。在 USDOT（美国运输部）的一份报告中指出<sup>[9]</sup>，如果考虑火灾时烟雾的影响，计算出来的距离值差别见表 2。

表 1 拦蓄区最小容积规定的比对

Table 1 Comparison of minimum volume for impounding area

标 准	内 容
NFPA 59A—2006	LNG 储罐拦蓄区最小容积 $V$ , 按下列规定确定: (1) 单个储罐的拦蓄区, $V$ 等于储罐的容积; (2) 多个储罐的拦蓄区, $V$ 等于所有储罐的总容积或者最大储罐容积的 110%; (3) 若防护堤设计用来考虑灾难性失效, $V$ 等于 100%
NFPA 59A—2009	单个 LNG 储罐拦蓄区最小容积 $V$ , 按下列规定确定: (1) $V$ 等于储罐容积的 110%; (2) 若拦蓄区设计用来考虑承受因主容器灾难性失效引起的动态浪涌, $V$ 等于最大储罐容积的 100%; (3) 若拦蓄区的高度等于或高于储罐液位, $V$ 等于 100%。 多个 LNG 储罐拦蓄区最小容积 $V$ , 按下列规定确定: (1) $V$ 等于所有储罐的总容积; (2) 对因低温或因拦蓄区内一储罐泄漏着火而引起拦蓄区内其他储罐泄漏, 在采取了防止措施条件下, $V$ 等于拦蓄区内最大储罐容积的 110%

表 2 点源模型和固体火源模型热辐射距离计算的比对

Table 2 Comparison of fire radiation distance between point source and solid flame models

火灾直径/m	火灾中心到辐射通量 $5\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 地方的距离		点源模型—PoMISE 模型 / PoMISE 模型 /%
	NFPA 59A 点源模型	固体火焰 PoMISE 模型	
20	63.2	103.1	-38.7
30	94.8	147.7	-35.8
50	157.9	212.9	-25.8
100	315.9	339.8	-7.0
200	631.7	570.3	10.8
300	947.6	785.2	20.7

由表 2 可知, 当火灾直径 ( $D$ ) 较小时, 点源模型计算出来的热辐射距离明显偏小, 低估了热辐射距离而使危险性提高; 当火灾直径较大时, 点源模型计算出来的热辐射距离又明显偏大, 高估了热辐射距离而使征地费用增加。

3.2.3 关于 LNG 泄漏扩散计算模型 NFPA 59A—2009 不再规定使用原标准的 DEGADIS 扩散计算模型, 对替代模型只做了以下规定: ①依据由 NFPA 研究基金会 2007 年发布的模型评估协议《LNG 蒸气扩散安全分析模型》, 通过独立机构评估; ②被主管部门所认可。凡满足以上两个条件之一的模型, 均可以作为 LNG 泄漏扩散计算的替代模型。

3.2.4 关于 LNG 或易燃制冷剂储罐与暴露建筑物最小间距确定方法 对容量小于或等于 70000 gal ( $265\text{ m}^3$ ) LNG 或易燃制冷剂储罐与暴露建筑物最小间距规定仍适用于原来标准的规定, 而对容量大于 70000 gal ( $265\text{ m}^3$ ) LNG 储罐与相邻储罐最小间距的规定则进行了修订。因为原规定没有充分考虑邻近储罐发生火灾时对单容罐的安全问题, 有可能导致单容罐最小间距偏小。另外仅用热通量

标准还不足以确定储罐间的最小距离, 有可能导致确定的单容罐间距过小, 而双容罐和全容罐间距过大。因为当火灾发生时, 在物体温度计算或结构失效判断中还应考虑材料的热学性质 (密度、特殊热量、传热率、反射率)、几何特征和表面冷却等情况。

3.2.5 关于增加危险性评估内容 NFPA 59A—2009 增加了危险性评估内容作为附录 E, 其主要内容与 EN1473 的要求类似<sup>[4]</sup>, 即危险性评估要求贯穿于场站选址、设计、工程采购和施工以及运行等全过程, 并遵照 HAZOP (危险可操作性) 等较通行的风险性评估程序, 来判断 LNG 场站设置、设计、施工和运行过程中可能出现的危险性程度, 并对各种危险的可接受性进行评价。具体实现过程如下。首先, 对危险源和事故类型情景进行分析, 确定事故或危险的年发生率, 进而得出危险等级。在确定事故危害时, 不仅要采用经科学论证、经验证实以及被认可的方法或模型 (如 DEGADIS 气体扩散模型和 LNG FIRE III 热辐射模型), 还要正确采用相关标准给出的确定危害范围的限定数据 (如辐射强度和着火浓度, 定量分析事故或危险的后

果)。最后，根据以上分析结果，对 LNG 场站的总体危险性进行评估，并用风险可接受矩阵来判断安全上是否可接受。

#### 4 结束语

目前我国正在准备对 GB/T 20368—2006 版本进行修订工作。跟踪 NFPA 59A 标准更新的最新动态，分析和研究 NFPA 59A 修改的最新报告 (ROP)，可以了解美国 LNG 相关标准的发展动向和技术要点，为 GB/T 20368 的修订提供借鉴和帮助，使我国 LNG 标准的修订能与国际标准发展同步，以保证我国 LNG 产业的健康、稳步发展。

在关注美国 NFPA 59A 标准发展的最新动态同时，还应关注其他国家的 LNG 标准。例如，欧洲的 EN 1473，日本的高压天然气保护法等标准。对各国 LNG 标准的研究，有助于把握国际 LNG 行业发展的最新动态，不断提升我国 LNG 产业发

展水平，减小在标准化建设方面与国际发达国家的差距。

#### References

- [1] NFPA 59A—2009
- [2] EN 1473—2007
- [3] GB 50183—2004
- [4] GB 50028—2006
- [5] GB/T 20368—2006
- [6] NFPA 59A—2001
- [7] Committee on Liquefied Natural Gas (NFPA 59A). 2008 Annual Revision Cycle Report on proposals (ROP), National Fire Protection Association (NFPA), 2007
- [8] Committee on Liquefied Natural Gas (NFPA 59A). 2008 Annual Revision Cycle Report on Comments (ROC), National Fire Protection Association (NFPA), 2008
- [9] Phani K Raj. Spectrum of Fires in an LNG Facility-Assessments, Models and Consideration in Risk Evaluations. Submitted to Pipeline & Hazardous Materials Safety Administration. US Department of Transportation, 2006.