

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2017.01.003

开展LNG、CNG定量风险评估, 提升场站安全管理水平

□ 北京市燃气集团有限责任公司(100035)董久樟 张靖

□ 中国寰球工程有限公司(100012)舒小芹

摘 要: 采用定量风险分析的方法,北京燃气集团选取了4个液化天然气(LNG)和压缩天然气(CNG)设施样本,对LNG、CNG储罐或拖车可能发生的LNG、CNG泄漏事故进行了辨识分析,并对扩散、火灾和爆炸后果进行了模拟,对场站及其周边设施的可能承受的个人风险和社会风险进行了评估,并对LNG、CNG场站及设施的风险管控和提升安全管理水平,给出了具体改进措施。

1 项目实施背景

北京市燃气集团经过近十多年的高速发展,供气规模越来越大,截止到2015年达145亿 m^3/a 。气源保障问题愈显突出。在现有管网供气的基础上,引入了多种气源保障形式,如LNG、CNG。LNG是北京城市燃气的重要来源之一,可以补充基础负荷,也可起到调峰、应急供气作用;CNG还可为那些管网未到达的用气点提供供气服务,同时LNG、CNG又是北京市车用天然气的重要气源。由于LNG、CNG在生产、储存、运输、销售、使用诸多环节中发生泄漏时,很容易与空气形成爆炸混合物,遇火源会导致爆炸事故的发生,造成重大财产及人身伤亡。企业迫切需要针对LNG、CNG场站及储气设施(储罐)在发生极端情况下如火灾和爆炸时的危险性进行定量分析,建立事故危害模型,进行科学的数据分析,制定有效的防控应急措施,确保北京地区LNG、CNG场站的安全。

北京燃气绿源达清洁能源有限公司是北京燃气集团下属唯一一家集LNG、CNG业务于一身的专业化公司,拥有LNG、CNG加气站31座、LNG、CNG配送

运输车100余辆,供气范围覆盖整个北京市。我们从该公司选取4个典型样本作为风险评估对象,具体如下:

- (1) 18 m^3 CNG长管拖车1辆;
- (2) 天宫院LNG加气站30 m^3 卧式LNG储罐1座;
- (3) 潘家庙LNG中转站6*150 m^3 LNG储罐;
- (4) 西集LNG应急储备中心5 000 m^3 LNG储罐1座。

2 评估方法介绍

本次风险评估采用定量风险评价的方法,对研究场站发生火灾和爆炸的可能性及其后果影响进行量化分析,以此得到研究场站的个人风险和社会风险,进而判断其是否满足国家当前危险化学品行业可接受风险水平,并提出具体的风险削减措施,以提升场站和设施的安全。

定量风险评价的主要步骤如下,如图1所示^[1]。

2.1 危害事件分析

在本评估工作中,确定此次评估工作所研究的潜

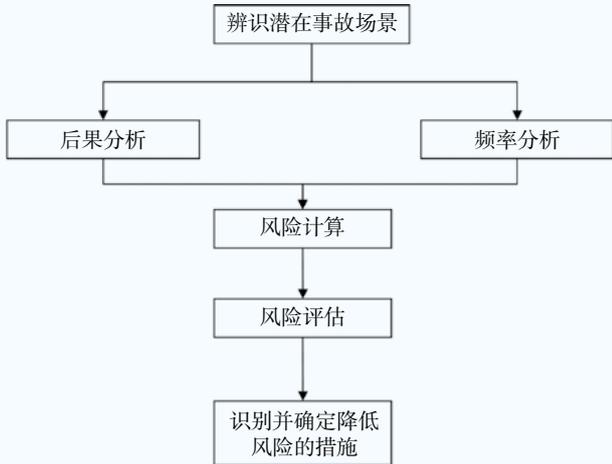


图1 定量风险分析工作流程

在重大危害事件为LNG、CNG储罐泄漏。LNG和CNG泄漏后果可能有喷射火、池火、闪火、爆炸和甲烷蒸气云的扩散。

当LNG、CNG储罐故障失效时，所存储的常压或带压LNG或CNG泄漏到大气环境中，产生喷射射流、渗漏滴液或流股，若立即遇点火源，则喷射流股形成喷射火，液池形成池火；扩散的蒸气云团若遇点火源，则属于延迟点火，可能在相对空旷区域发生闪火、或在拥塞区域形成蒸气云爆炸。该过程可用图2所示的事件树予以说明。

2.2 频率分析

根据图2对事件发生的可能性（事件发生频率）进行分析，进而得到带概率分析的事件树。

在本评估项目中，泄漏、火灾、爆炸、蒸气云扩散的发生频率计算公式如下所示：

$$F_{\text{leak}} = F_{\text{leak}} \times P_{\text{loc}} \times P_{\text{ori}} \times P_{\text{wind}}$$

$$F_{\text{fire}} = F [P_{\text{II}} + (1 - P_{\text{II}}) P_{\text{DI}}]$$

$$F_{\text{exp}} = F (1 - P_{\text{II}}) P_{\text{DI}} P_{\text{E}}$$

$$F_{\text{disp}} = F (1 - P_{\text{II}}) (1 - P_{\text{DI}})$$

其中：

F_{leak} =失效频率

P_{loc} =在某假定地点的泄漏概率

P_{ori} =泄漏方向概率

P_{wind} =风场条件概率

P_{II} =立即点火概率

P_{DI} =延迟点火概率

P_{E} =某点爆炸概率

2.2.1 失效频率

由于本项目旨在评估LNG/CNG储罐或槽车发生泄漏事故的风险，因此，设备失效仅考虑设备本体失效和与设备本体第一道连接点处的失效。设备失效数据选用国际上LNG行业普遍认可和采用的数据库^{[2][3][4][5]}，如表1所示。此外，在计算设备各种不同孔径泄



图2 带概率分析的LNG或CNG泄漏事件树

漏频率时，还考虑了其他外部破坏事件的贡献，按照2000年地震再现率估算出地震或与之相当的破坏事件的年发生频率为 $5.0E-04$ ，以此代入频率分析。

2.2.2 风场条件概率的确定

风速、风向由于在很大程度上决定了扩散影响区域和影响范围，因此，风速和风向对量化风险分析的结果有较大影响，需要慎重取值、合理假定。

本次评价选取了北京地区一年的气象条件，分析其风速和风向，如图3、图4所示，以确定风场条件概率。根据一年气象条件，本项目选取3mph（1.4m/s）和6mph（2.7m/s）两种风速条件，其年变化概率为

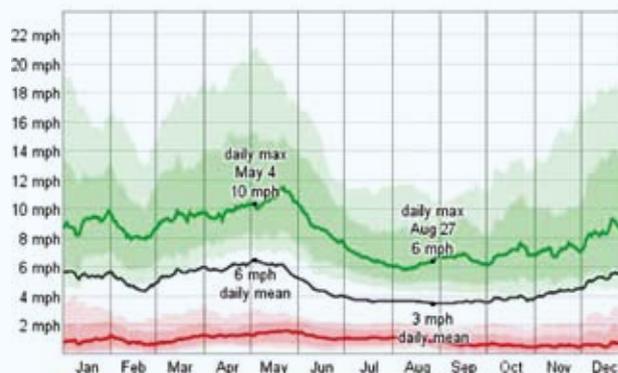


图3 北京地区某年日最小（红）、最大（绿）、平均（黑）风速

表1 用于计算泄漏频率的失效数据及来源表

设备	失效类型	失效频率（每年）	数据来源
低温储罐进出管线	破裂	$3.00E-05$	联邦能源管理委员会FERC
双容罐	全罐破裂	$5.00E-07$	联邦能源管理委员会FERC
双容罐	1m（3ft）孔	$1.00E-05$	联邦能源管理委员会FERC
双容罐	0.3m（1ft）孔	$3.00E-05$	联邦能源管理委员会FERC
双容罐	0.01m（0.4in）孔	$1.00E-04$	联邦能源管理委员会FERC
压力容器	全破裂	$5.00E-06$	联邦能源管理委员会FERC
压力容器	0.01m（0.4in）孔	$1.00E-04$	联邦能源管理委员会FERC
单容罐	全破裂	$5.00E-07$	美国国家防火协会NFPA
双容罐	全破裂	$1.25E-08$	美国国家防火协会NFPA
压力容器	全破裂	$5.00E-07$	美国国家防火协会NFPA
双容罐 450m ³ ~4 000m ³	150mm孔	$3.00E-06$	英国健康与安全执行局UK HSE
双容罐 450m ³ ~4 000m ³	500mm孔	$1.00E-06$	英国健康与安全执行局UK HSE
双容罐 450m ³ ~4 000m ³	全破裂	$5.00E-08$	英国健康与安全执行局UK HSE
双容罐 4 000m ³ ~12 000m ³	225mm孔	$3.00E-06$	英国健康与安全执行局UK HSE
双容罐 4 000m ³ ~12 000m ³	750mm孔	$1.00E-06$	英国健康与安全执行局UK HSE
双容罐 4 000m ³ ~12 000m ³	全破裂	$5.00E-08$	英国健康与安全执行局UK HSE
双容罐 >12 000m ³	300mm孔	$3.00E-06$	英国健康与安全执行局UK HSE
双容罐 >12 000m ³	1 000mm孔	$1.00E-06$	英国健康与安全执行局UK HSE
双容罐 >12 000m ³	全破裂	$5.00E-08$	英国健康与安全执行局UK HSE
压力容器	全破裂	$4.00E-06$	英国健康与安全执行局UK HSE
压力容器	50mm孔径	$5.00E-06$	英国健康与安全执行局UK HSE
压力容器	25mm孔径	$5.00E-06$	英国健康与安全执行局UK HSE
压力容器	13mm孔径	$1.00E-05$	英国健康与安全执行局UK HSE
压力容器	6mm孔径	$4.00E-05$	英国健康与安全执行局UK HSE

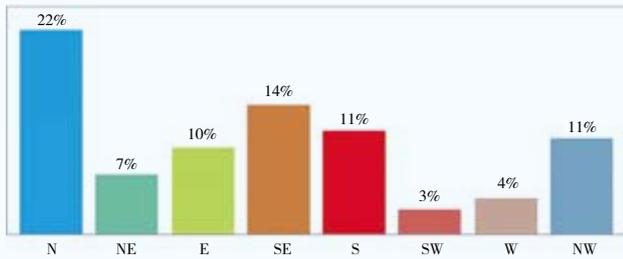


图4 北京地区某内各风向频率

50%；选取52°F为典型环境温度，假定湿度为50%。

2.2.3 点火概率

本次评价根据OGP点火模型中点火概率与泄漏流量的关系曲线确定点火概率，如图5所示。根据OGP点火模型理论，点火概率与泄漏条件有关^[6]。

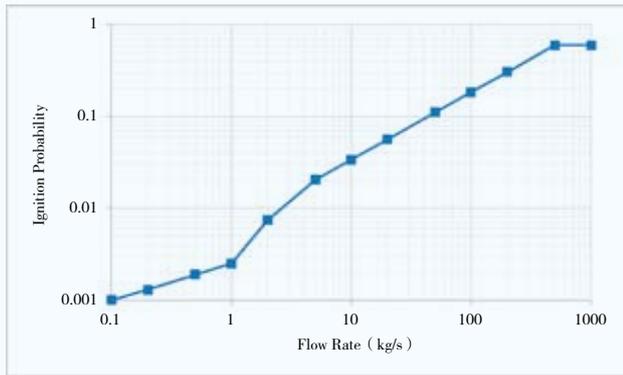


图5 点火概率与泄漏流量关系曲线

2.3 后果分析

本次评估利用数值模型和基于计算流体力学（CFD）的模型，对泄漏后液池的形成、蒸气云扩散、火灾和爆炸后果进行模拟^[7]。

扩散后果采用DEGADIS模型进行分析，这是美国官方规定在进行LNG液池模拟时应采用的模型。该模型根据液池大小和风场条件可得到下风向的甲烷蒸气浓度（如图6所示）。

该模型虽然考虑了地面粗糙度，但没有考虑建筑物等物体对风场和扩散的影响。因此对本项目确定的所有场景，首先采用DEGADIS模型进行计算；当建筑物有可能影响扩散后果、DEGADIS模拟结果不合理时，则部分场景选用由美国国家标准和技术协会（NIST）开发的FDS模型（计算机流体力学模型CFD）进行模拟（扩散模拟结果如图7所示），以校正DEGADIS结果。

本项目池火后果模拟采用由气体研究学会（GRI）开发的LNGFIRE3模型，为美国官方认可的LNG池火模拟软件。

CNG储罐的带压泄漏和扩散也是本次研究内容之一，将选择油气商国际协会（International Association of Oil & Gas Producers）所推荐的分析方法。

LNG蒸气扩散模拟结果用于确定气体云团在每个场站可能影响的位置和范围，同时还用于估算发生闪

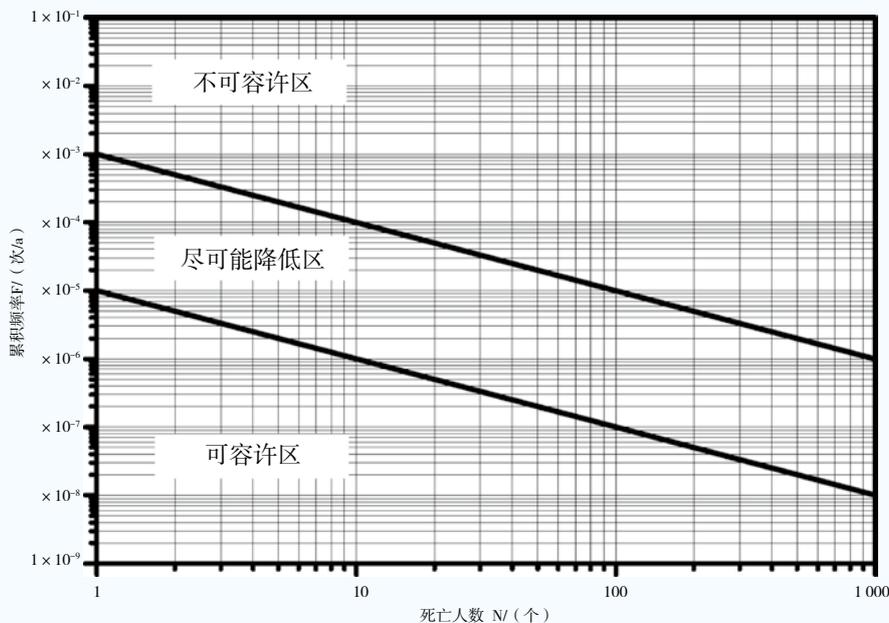


图6 可容许社会风险标准（F-N）曲线

火或爆炸的概率。

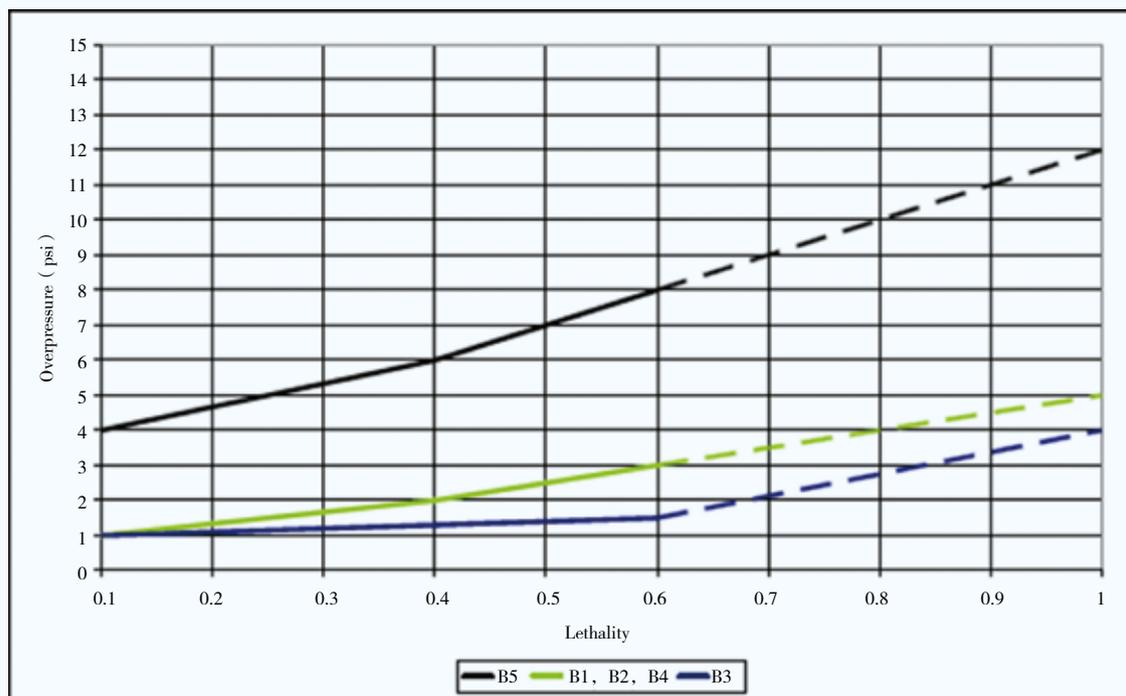
蒸气云爆炸选用了BST模型, 该模型根据气体云团的大小、组成及其所形成环境的特性来定义爆炸源, 一旦选定了爆炸源, 可根据设定场景条件从图8中查到距离爆炸源某点处的最大超压值和冲量。

2.4 风险可接受水平

场站风险可接受水平按照《危险化学品生产、

储存装置个人可接受风险标准和社会可接受风险标准(试行)》进行了评估。

在评估火灾和爆炸后果影响时, 通常考虑热辐射以及超压值的破坏影响, 本评估采用了国际上普遍认可的限值^{[9][10][11]}(表3、表5), 同时参考了GB50183《石油天然气工程防火设计规范》对热辐射值的控制要求(见表4)。



注: 建筑类型:

B1: 木质结构的房屋或棚屋

B2: 钢框架/金属护墙板或用预制件构造的建筑

B3: 非钢筋混凝土的砌体承重墙体建筑

B4: 钢框架或混凝土结构且加筋砌体承重填充或外墙

B5: 钢筋混凝土或加筋砌体承重剪力墙体建筑

图7 爆炸超压影响

表2 我国个人可接受风险标准值表

防护目标	个人可接受风险标准 (概率值)	
	新建装置 (每年) ≤	在役装置 (每年) ≤
低密度人员场所 (人数 < 30人): 单个或少量暴露人员。	1×10^{-5}	3×10^{-5}
居住类高密度场所 (30人 ≤ 人数 < 100人): 居民区、宾馆、度假村等。 公众聚集类高密度场所 (30人 ≤ 人数 < 100人): 办公场所、商场、饭店、娱乐场所等。	3×10^{-6}	1×10^{-5}
高敏感场所: 学校、医院、幼儿园、养老院、监狱等。 重要目标: 军事禁区、军事管理区、文物保护单位等。 特殊高密度场所 (人数 ≥ 100人): 大型体育场、交通枢纽、露天市场、居住区、宾馆、度假村、办公场所、商场、饭店、娱乐场所等。	3×10^{-7}	3×10^{-6}

(注: 本次评估采用在役装置个人可接受风险标准)

表3 国际通用的热辐射影响

热辐射值 (kW/m ²)	后果
31.5	<ul style="list-style-type: none"> · 足以导致工艺设备损坏 · 立即暴露时极可能导致死亡 · 致死率100%
12.6	<ul style="list-style-type: none"> · 点燃衣物、融化管道时所需的最小能量 · 邻近侧带保温的薄钢可能结构失效 · 点燃长时间暴露的木材 · 中等时间长度的暴露可能导致死亡 · 户外致死率70%
5	<ul style="list-style-type: none"> · 威胁逃生路线 · 人员无遮挡、但穿着适当防护服时仅能开展1分钟以内可完成的紧急操作 · 紧急撤离是可能的，但20秒内若无法提供有效遮挡可能导致严重疼痛

表4 中国规范中对LNG围堰和集液池的热辐射影响要求

热辐射值 (kW/m ²)	后果
30	· 不能出厂界
9	· 不得有活动场所、学校、医院、监狱、拘留所和居民区等
4	· 不能有50人及以上的室外活动场所

表5 爆炸超压影响

超压值		后果
psig	bar	
0.15	0.01	· 建筑物玻璃破裂
1.0	0.07	<ul style="list-style-type: none"> · 房屋部分损毁，无法居住 · 钢或铝盘失效
2.0	0.14	<ul style="list-style-type: none"> · 房屋墙体或屋顶部分坍塌 · 普通砖墙失效
3.6	0.25	· 钢筋混凝土失效
5.0	0.35	<ul style="list-style-type: none"> · 室外人员30%致死率 · 汽车加膜玻璃破裂
7.25	0.5	· 室外人员100%致死率
10	0.69	· 可能建筑物整体失效

3 结论以及成果应用

3.1 评估结论：

样本一：压缩天然气拖车安全风险是：

(1) 与压力突然释放相关的个人风险可以忽略不计。

(2) 与蒸气云爆炸有关的个人风险在“不可接受区”外，但在ALARP“尽可能降低”区间内，在采

取了一定措施后风险可接受。

(3) 在位拖车及在运输途中的拖车所产生的社会风险可忽略不计。

提出的建议是：当拖车入场在用时，应采取措施或调整拖车停放位置，尽量减少拖车停放点朝向附近有人建筑物的窗户。

样本二：天宫院LNG加气站安全风险是：

(1) 与池火灾有关的风险是可以接受的。

(2) 与爆炸相关的风险是可以接受的。

(3) 加油站西侧的道路区域面临较高的闪火威胁。

(4) 站内人员和公众由于闪火而受到的社会风险在ALARP“尽可能降低”区间内，在采取了一定措施后风险可接受。

提出的建议是：(1) 建立预警机制、制定应急预案，一旦发生大量泄漏，及时通知加油站西侧道路的公众尽快从高风险区域内撤离疏散。(2) 对西侧道路沿线企业及人员分布情况进行评估，以便确定最佳疏散线路。理想情况下，应向西（远离场站泄漏点方向）疏散人群。

样本三：潘家庙中转站安全风险是：

(1) 与池火灾有关的风险是可以接受的。

(2) 布置有公寓楼和露天市场的特殊高密度区域，面临较高的爆炸超压风险（可能导致玻璃破碎）。

(3) 由于窗户破损而导致伤亡的影响范围约转运站周边400m。

(4) 转运站周边约200m的范围内存在较高的闪火风险。

(5) 站内人员由于闪火而受到的社会风险在ALARP区间内，但公众受到的社会风险超出可接受范围，在不可接受区间内。

提出的建议是：(1) 设置足够高的场站围栏，以控制天然气云团的扩散、引导气云使其抬升至安全区域，围栏的设计建议通过CFD模拟进行优化。

(2) 由于本次模拟所收集的人员分布等信息不足够详细，可能导致评估结果过于保守（如出现社会风险不可接受的情况）。建议对转运站周边人口密度和昼夜流动变化情况进行调查。(3) 采取减缓风险的措施，例如在转运站站内建筑窗户贴膜，以减少玻璃碎

片带来的潜在伤亡危险。

样本四:西集LNG应急储备中心安全风险是:

- (1) 爆炸导致的个人风险可以接受
- (2) 池火所导致的个人风险可以接受
- (3) 爆炸和池火导致的社会风险是可以接受的

提出的建议是:由于本次仅评估了LNG储罐泄漏可能产生的风险,站内液化设施尤其是作为制冷剂的重烃由于其相对更高的反应活性和危险性,可能对厂内人员和设施带来更大风险。这需要对其进行进一步补充分析评估。

3.2 成果应用

(1) 在场站安全设计上的应用

本项目评估的三个场站及其CNG拖车均已投用,虽然通过评估,由于储罐失效导致的大多数风险尚在可接受范围内,但仍然发现有部分风险处于较高风险水平或位于不可接受区域,譬如发生爆炸时可能对临近建筑物的冲击波影响(窗户的损坏等)、发生气体扩散时可能导致在局部区域形成爆炸性危险混合气体云团或较高窒息浓度的可燃气体云团,这些都成为潜在的危险隐患。

若在设计阶段适当时期,开展了本研究,并根据研究成果采取必要的安全措施,如:优化场站的隔离切断设施,通过气体检测或低温液体检测等预报警手段加强对泄漏点的监控,确定合理的云团扩散隔离区,在可能的蒸气云团爆炸范围内避免布置功能重要的或人员密集的建筑,或者设置必要的抗爆防爆设施(如抗爆墙、无门窗孔洞开孔的抗爆结构设计、窗户玻璃加筋等)。这将极大提升场站本质安全水平,必将成为场站安全生产运营的根本保障。

(2) 在场站安全运行及应急管理方面的应用

此次风险评估项目的研究成果,可应用在4个方面:一是根据报告所提出的管理建议进行整改,进一步完善管理手段,增加技术措施,从而预防事故发生,保障站内员工人身安全;二是将此次风险和事故后果的分析结论,作为职工三级教育和日常安全教育材料,提高职工的安全意识和防范意识;三是利用此次风险评估项目的分析方法,对其他储气设施设备开展风险评估;四是根据此次研究成果,修订完善场站的应急预案和现场处置方案,针对评估出的事故风险组织应急演练,提高场站应急响应和处置能力。

此次风险评估提升了所研究场站LNG、CNG设施的安全生产和应急管理水平,在其它同类LNG、CNG设备和场站的应急管理系统建设方面也提供了一个新思路。此次风险评估的结果,还可用于LNG、CNG泄漏应急预案编制和应急管理的培训演练。

本次评估的方法研究、成果应用是燃气集团在LNG、CNG加气站安全管理方面的一个积极探索,也必将推动北京燃气集团在LNG/CNG/天然气安全生产水平和业绩的提升。

参考文献

- 1 Centre for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Second Edition, 2000
- 2 Kohout, A. (2012). US Regulatory Framework and Guidance for Siting Liquefied Natural Gas Facilities—A Lifecycle Approach, Mark Kay O' Connor Process Safety Center 15th Annual International Symposium, Oct 23–25, 2015
- 3 NFPA 59A, Standard for the Production, Storage, and Handling of Liquefied Natural Gas (LNG), 2013 Edition
- 4 UK HSE Land Use Planning Guide, <http://www.hse.gov.uk/landuseplanning/failure-rates.pdf>
- 5 OGP Risk Assessment Data Directory, Storage Incident Frequencies, International Association of Oil & Gas Producers, OGP Report No. 434–3, March 2010
- 6 OGP Risk Assessment Data Directory, Report No. 434–6.1, March 2010, Ignition Probabilities
- 7 OGP Risk Assessment Data Directory, Consequence Modeling, International Association of Oil & Gas Producers, OGP Report No. 434–7, March 2010
- 8 Parihar, A., Vergara, C., Clutter, J., (2011). Methodology for consequence analysis of LNG releases at deepwater port facilities. Safety Science, 49, 686–694
- 9 Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Second Edition, AIChE, 2000
- 10 OGP Risk Assessment Data Directory, Vulnerability of Humans, International Association of Oil & Gas Producers, OGP Report No. 434–14.1, March 2010
- 11 OGP Risk Assessment Data Directory, Vulnerability of Plant/ Structure, International Association of Oil & Gas Producers, OGP Report No. 434–15, March 2010