

# LPG储罐泄漏爆炸影响范围的模拟分析

□ 山东建筑大学 (250101) 高云峰 田贯三

**摘要:** LPG (液化石油气) 爆炸极限约为2%~10%, 一旦从储存系统泄漏到大气环境中, 极易引起火灾爆炸等事故。因此, LPG储存站、储配站和灌装站的储罐布置应考虑防火间距。本文采用超压-冲量准则、世界银行推荐危害关系式模拟计算不同容积LPG储罐发生泄漏爆炸伤害半径, 并将计算结果对比分析, 确定防火安全间距, 其结果可作为LPG储存站、储配站和灌装站建设的参考依据。

**关键词:** 蒸气云爆炸 液化石油气 伤害半径 超压-冲量准则 TNT当量

## Sphere Influence of LPG Tank Leak Explosion Simulation Analysis

Gao Yunfeng, Tian Guansan Shandong Jianzhu University

**Abstract:** LPG (liquefied petroleum gas) explosion limit is about 2%~10%, once from the storage system leak into the atmosphere, extremely easy to cause fire and explosion accidents. Therefore, LPG storage station, storage and distribution station and filling station layout should consider the tank fire spacing. In this paper, overpressure - impulse guidelines, the World Bank recommended jeopardize relations simulation of different volumes LPG tank leak explosion damage radius, and comparative analysis of the results of calculations to determine the spacing of fire safety, and the results can be used as LPG storage station, storage and distribution station and filling station construction reference.

**.Keywords:** vapor cloud explosion LPG damage radius overpressure - impulse TNT equivalent

LPG (液化石油气) 作为一种洁净能源, 被广泛应用于居民生活、工业生产和汽车燃料。LPG以液态的形式储存于储罐中, 一旦发生泄漏吸收环境热量气化为气体, 遇明火则发生燃烧爆炸, 爆炸产生的超压冲击波会对周围构筑物及生命财产造成损失巨大。因此, LPG储罐的选址及布置在LPG项目建设中至关

重要, 确定合适的安全距离可以很大程度上保证人身及财产经济安全。我国现有LPG储存站、储配站和灌装站5 000多座, 其中山东有1 500多座, 约占全国的三分之一<sup>[1]</sup>。很多场站存在防火间距过小的问题, 不断有LPG场站泄漏发生燃烧爆炸的事故发生。本文主要对LPG泄漏时发生爆炸引起的破坏程度及影响范围

进行分析。

## 1 LPG储罐类型简介

LPG常温常压储罐有30m<sup>3</sup>、50m<sup>3</sup>、100m<sup>3</sup>、150m<sup>3</sup>、200m<sup>3</sup>、400m<sup>3</sup>、1 000m<sup>3</sup>等规格,设计压力一般为1.76MPa,最高工作压力1.6MPa,设计温度50℃/-19℃。LPG在储配运行过程中,极易因为泄漏造成重大危险事故,其爆炸极限一般为2%~10%<sup>[2]</sup>。气化后的液化石油气的密度由于比空气密度大,主要漂浮在地表面,当液化石油气空气中体积浓度达到爆炸极限范围时,遇到明火将会引起燃烧爆炸。LPG成分按丙烷、丁烷各占50%计算,各组分物理、化学性质见表1。

表1 LPG主要成分的物理、化学性质

主要成分	丙烷	丙烯	正丁烷	丁烯
闪点/℃	-104	-108	-82	-80
自燃点/℃	480	458	408	443
引燃温度/℃	450	455	287	385
最小引燃能量/MJ	0.25	0.28	0.25	0.25
爆炸下限/(% (体积分数))	2.10	2.00	1.90	1.70
爆炸上限/(% (体积分数))	9.50	11.10	8.50	9.00
高热值/(10 <sup>4</sup> kJ/m <sup>3</sup> )	10.12	9.36	13.38	12.57
低热值/(10 <sup>4</sup> kJ/m <sup>3</sup> )	9.31	8.76	12.35	11.76
最大爆炸压力/MPa	0.843	0.843		
火灾危险性等级	甲A			

## 2 LPG储罐泄漏爆炸影响范围分析

### 2.1 超压-冲量准则

冲击波超压有很强的破坏力,储罐等压力容器发生爆破时产生的能量主要以空气冲击波、碎片、容器残余变形等三种形式释放出来,通过空气冲击波形式放出的能量占绝大多数。爆破初始阶段,冲击波波阵面上将产生一个相当大的正压力(冲击波超压),有时候可以达到几个甚至几十个大气压。蒸气云爆炸超压冲击波造成的伤害范围划分为4个区域:死亡区、重伤区、轻伤区及财产损失区。

### (1) 死亡区

死亡区内建筑物、设备等受到毁灭性破坏,在此范围内人员无法受到保护,无一例外受重伤以致死亡,该范围内人员受超压冲击,导致肺部出血而失去生命的占据一半左右。按TNT冲击波超压-冲量准则公式计算死亡区半径R<sub>1</sub>:

$$R_1 = 13.6 (W_{TNT}/1000)^{0.37}, \text{ 其中 } W_{TNT} = \eta \cdot W \cdot H_b/H_{TNT} \quad (1)$$

式中:  $W_{TNT}$ ——LPG的TNT当量, kg;

$H_b$ ——LPG高热值, kJ/kg, 由表1中各组分计算得到46 055kJ/kg;

$H_{TNT}$ ——TNT爆炸热值, kJ/kg, 一般取平均值4 686kJ/kg;

$W$ ——蒸气云中LPG泄漏量, kg;

$\eta$ ——可燃蒸气云爆炸效率, 受爆炸情形下风向、周围障碍物情况、爆炸时温度和压力状况、物质本身的活性以及气云形状、大小等因素影响, 可变性比较大, 取值范围为0.1%~10%<sup>[3]</sup>。

一般储罐的管道接头和阀门等辅助设备易发生泄漏, 裂口尺寸取其连接管道直径的20%或者按照管道全部断裂进行考虑。由于每次爆炸实际泄漏量很难估计, 为确保防火间距可靠性, 假定不同容积储罐均发生连续全部泄漏, 爆炸一次完成, TNT当量按参与蒸气云爆炸最大反应效率计算(取10%)。

### (2) 重伤和轻伤区

受爆炸超压冲击波影响, 重伤区内的建构筑物也会受到严重损坏, 人员如果躲闪不及, 绝大多数将受重伤, 甚至死亡。假定计算条件, 重伤超压取44kPa, 达到该值时在重伤区范围内的人员因冲击波作用导致耳膜破裂的概率为50%。轻伤区内人员绝大多数受到轻微伤害, 基本平安无事, 极少数人受重伤, 死亡的可能性很小。假定计算条件, 轻伤超压取17kPa, 达到该值时在轻伤区范围内人员因冲击波作用导致耳膜破裂的概率为1%。重伤和轻伤区半径按蒸气云爆炸冲击波超压公式计算:

$$\begin{cases} \ln(\Delta P/P_0) = -0.9126 - 1.5058 \ln Z + 0.167 \ln^2 Z - 0.032 \ln^3 Z \\ Z = R_{2,3} \cdot (P_0/E)^{\frac{1}{3}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $Z$ ——计算中间因子;

$E$ ——蒸气云爆炸总能量, J;

$P_0$ ——大气压, Pa, 取101 325Pa;

$R_{2,3}$ ——超压伤害半径, m。

建筑物破坏程度的决定因素主要有爆炸源性质、与爆炸源间距离以及建筑物本身的结构等。据爆炸量与离爆炸源距离的不同,按英国对建筑物破坏等级的划分标准,可将危险源划分为5个不同等级的建筑物破坏区域,如表2所示。LPG供应站建筑物按B级破坏等级计算,确定财产损失半径 $R_4$ :

$$R_4 = K_f \cdot (W_{TNT})^{1/3} [1 + (3175/W_{TNT})^2]^{1/6} \quad (3)$$

式中: $K_f$ ——破坏常数,与房屋破坏程度有关,在精度不太高的财产损失计算中,根据B级破坏状况求出的半径可作为财产损失半径<sup>[4]</sup>。

根据超压-冲量准则各关系式模拟计算出单罐容积30m<sup>3</sup>到1 000m<sup>3</sup>的LPG泄漏后形成的不同伤害区域内最大危险伤害半径见表3,不同容积LPG储罐泄漏后伤害半径与单罐容积的关系见图1。

泄漏燃气与空气混合形成蒸气云直接爆炸的必要条件是有点火源,爆炸强度与泄漏量密切相关。对于LPG储罐,存在两种泄漏方式:连续泄漏和瞬时泄

漏,严重的火灾事故,通常是以连续泄漏的方式形成持续的喷射火。爆炸中心附近的压力波动范围也相当剧烈,首先压力骤升,其次以非常快的速度进行衰减,进而由正压变为负压,这个过程发生的时间是极短的,这是因为发生泄漏时罐内液体不会在瞬间完全气化,且气化的LPG形成爆炸混合物需要一个过程,加上空气的稀释作用以及风速的影响,爆炸过程通常分几次进行<sup>[5]</sup>。根据LPG储罐性质以及灾害程度将爆炸过程归为三类,分别是一次爆炸、二次爆炸及三次爆炸。一次爆炸是非化学性的,通常是在储罐存在致命缺陷或受到异常外力作用,致使储罐受压元件损坏而产生爆炸,产生的冲击波和抛飞碎片会毁坏设备,伤害设备附近人员,更为严重的是引发二次爆炸。一次爆炸在撕裂容器的过程中,气体与金属强烈摩擦产生静电极易引燃气体,即使容器采取了良好接地消静电措施,也难免有泄出气体与覆盖范围内可能存在的火源遭遇而被引燃,因此一次爆炸极易引发二次爆炸。二次爆炸是化学性的,在剧烈燃烧反应下释放全部燃烧热值,爆炸能量巨大,对于易燃液体的爆炸一

表2 房屋破坏程度

破坏等级	破坏常数 $K_f$	破坏状况
A	3.8	房屋几乎被完全摧毁
B	4.6	房屋50%~75%的外部砖墙被摧毁,或不能继续安全使用,必须推倒
C	9.6	屋顶部分或完全坍塌,1个~2个外墙部分被摧毁,承重墙严重破坏,需要修复
D	28	房屋隔板从接头上脱落,房屋结构至多受到轻微破坏
E	56	屋顶和盖瓦受到一定程度的破坏,10%以上的窗玻璃破裂,房屋经过修复可继续居住

表3 不同容积LPG储罐泄漏后伤害半径

序号	单罐容积 (m <sup>3</sup> )	泄漏量 (kg)	有效爆炸泄漏量 $W_{TNT}$ (kg)	爆炸总能量E (kJ/kg)	死亡半径 $R_1$ (m)	重伤半径 $R_2$ (m)	轻伤半径 $R_3$ (m)	财产损失半径 $R_4$ (m)
1	30	1 740	1 916.1	46 055	17	49	87	46
2	50	2 900	3 193.5	46 055	21	58	103	60
3	100	5 800	6 387	46 055	27	73	130	82
4	150	8 700	9 580.5	46 055	31	83	149	96
5	200	11 600	12 774	46 055	35	92	164	106
6	400	23 200	25 548	46 055	45	116	206	135
7	1 000	58 000	95 805	46 055	74	180	320	210

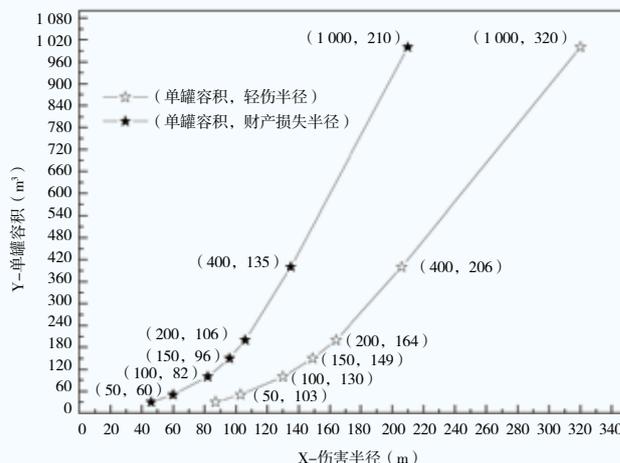
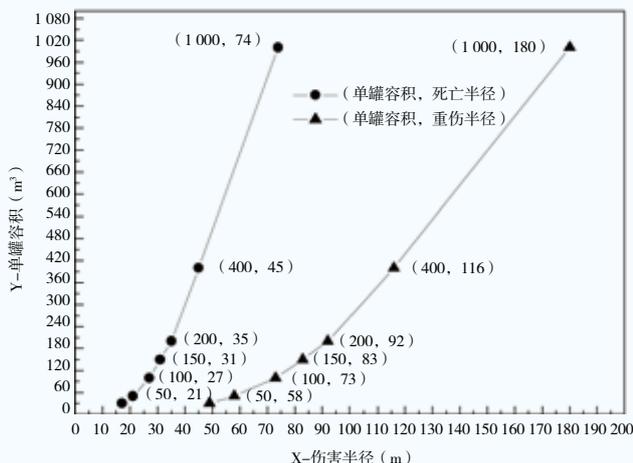


图1 伤害半径与单罐容积关系图

般只是储罐液面上方挥发的物质在浓度达到爆炸极限时参与爆炸，不会是所有物质都参与爆炸。三次爆炸是由二次爆炸引发的周围可燃物或爆炸性物质燃烧和连锁爆炸，比如引发粉尘爆炸和附近建筑物或森林火灾等，其灾害很难估计。

LPG泄漏后形成的蒸汽向下风向扩散的过程中形成爆炸危险区域，蒸汽的扩散受风速、地面粗糙程度、泄漏率的影响，由表3和图1可以看出，单罐容积30m<sup>3</sup>到1 000m<sup>3</sup>的LPG泄漏后形成的伤害半径逐渐增大。从伤害程度看，死亡半径随单罐容积变化斜率最大，重伤半径、财产损失半径及轻伤半径随单罐容积变化斜率依次减小，说明LPG爆炸瞬间超压冲击波造成毁灭性伤害范围基本受风速、地面粗糙度等因素的影响较小，只与参与爆炸的泄漏当量有关，假设全部泄漏（实际上爆炸分多次进行），单罐容积越大，爆炸瞬间TNT当量越大，造成的死亡半径越大。但随着泄漏时间增长，超压影响威力减弱，蒸汽的扩散速度受风速、泄漏率等因素影响明显，风速越大，大气湍流有利于蒸汽云团与空气混合，对云团进行加热稀释，单罐容积越小，预混云受风速稀释作用越明显，爆炸伤害范围扩展越慢；由于空气的稀释能力有限，单罐容积越大，泄漏率越快，处于爆炸极限浓度范围内的液化石油气持续时间越长，因此大型储罐比小型储罐泄漏爆炸伤害波及范围大的多。

### 2.3 世界银行推荐爆炸危害关系式

世界银行推荐的爆炸危害关系式根据爆炸总能量与产生的不同破坏等级之间的关系估算爆炸可能引起

的伤害范围，其计算公式为：

$$R=C_s \cdot (N \cdot E)^{\frac{1}{3}}, \text{ 其中 } E=V \cdot H_c \quad (4)$$

式中：R——爆炸伤害半径，m；

E——可燃蒸气云的单位爆炸总能量，等于可燃气体高燃烧热值与参与反应可燃气体的体积乘积<sup>[17]</sup>，kJ；

H<sub>c</sub>——可燃气体的高燃烧热值，kJ/m<sup>3</sup>，液化石油气取79.4kJ/m<sup>3</sup>；

V——参与反应可燃气体的体积，m<sup>3</sup>；

N——效率因子，与可燃蒸气持续扩散所造成的浓度下降和燃烧效率有关，取值范围为0.1%~10%，本模拟过程取最大扩散效率10%，其影响因素及变化范围同TNT当量法中能量释放率η；

C<sub>s</sub>——假定的爆炸实验参数，取决于破坏等级<sup>[6]</sup>，它的不同数值一定程度上代表着破坏程度的大小，具体分析见下表4。

表4 不同破坏等级下的损害极限值

破坏等级	C <sub>s</sub> 范围	设备损坏	伤害半径范围内环境危害极限值
等级二	0.211~0.40	10%玻璃破碎	
等级三	0.103~0.21	建筑物玻璃破碎	被玻璃碎片击伤
等级四	0.067~0.102	对建筑物造成可修复性损坏	1%耳膜破裂
			1%被碎片击伤
等级五	0.03~0.066	对建筑物、设备等造成毁灭性破坏	1%因肺部出血死亡
			>50%耳膜破裂
			>50%被碎片击伤

利用世界银行推荐危害关系式对单罐容积30m<sup>3</sup>到1 000m<sup>3</sup>的LPG泄漏后形成的不同破坏等级下最大危险范围计算结果见表5，不同容积LPG储罐泄漏后形成不同破坏等级下最大损害半径与单罐容积的关系见图2。

LPG储罐爆炸对近距离的人和建筑危害严重，事故影响基本表现在场区范围内，若罐区安全连锁系统失灵或现场工作人员操作失误等造成泄漏，液态液化石油气瞬间气化，倘若没有及时关闭罐体阀门，气化的蒸汽越来越多，积聚在有限空间内，使反应体内温度越来越高，超过LPG燃点后遇点火源将立即发生火灾爆炸；若罐体密封不严、保温层脱落、物体撞击或腐蚀泄漏使液体蒸汽与空气接触，一旦达到爆炸极限，遇点火源也会发生爆炸，不同破坏等级下的泄漏爆炸危害程度用C<sub>s</sub>值衡量，C<sub>s</sub>值越大，伤害半径越大<sup>[7]</sup>。由图2可以看出不同破坏等级下的伤害半径随单罐容积增大变化斜率依次降低，此结果与由超压-冲量准

则模拟结果相同。破坏等级五损害最为严重，爆炸冲击波对建筑物造成毁灭性破坏，该范围可以覆盖罐区大部分区域，发生爆炸时该区域内人员将立即死亡，且周边环境中的生产活动人员也会不同程度受伤，该罐区周边的液体、固体原料库以及危险品库等也会相继引起火灾爆炸等危险事故，即引发二次爆炸。破坏等级二伤害半径基本相当于超压-冲量准则中轻伤半径，该范围内人员、建筑物设备等基本不会受爆炸冲击波的影响，若周边建筑、人员活动区域距离罐体中心距离大于此伤害半径，即使罐区LPG全部泄漏发生爆炸也不会危及人们生命财产安全。

### 3 结论

(1) 对于LPG全部泄漏到环境中，当爆炸能量释放率达到最大值10%时，其最大TNT当量与储罐容积有关，容积越大，折合TNT当量越大。

表5 不同容积LPG储罐泄漏后形成的破坏等级

序号	单罐容积 (m <sup>3</sup> )	泄漏量 (kg)	有效爆炸泄漏量 W <sub>TNT</sub> (kg)	单位爆炸总能量 E (kJ/kg)	破坏等级五 (m)	破坏等级四 (m)	破坏等级三 (m)	破坏等级二 (m)
1	30	1 740	1 916.1	46 055	29.2	45.1	92.9	177.0
2	50	2 900	3 193.5	46 055	34.6	53.5	110.2	209.8
3	100	5 800	6 387	46 055	43.6	67.4	138.8	264.3
4	150	8 700	9 580.5	46 055	49.9	77.1	158.8	302.5
5	200	11 600	12 774	46 055	54.9	84.9	174.8	332.9
6	400	23 200	25 548	46 055	69.2	106.9	220.2	419.4
7	1 000	58 000	95 805	46 055	107.5	166.1	341.9	651.2

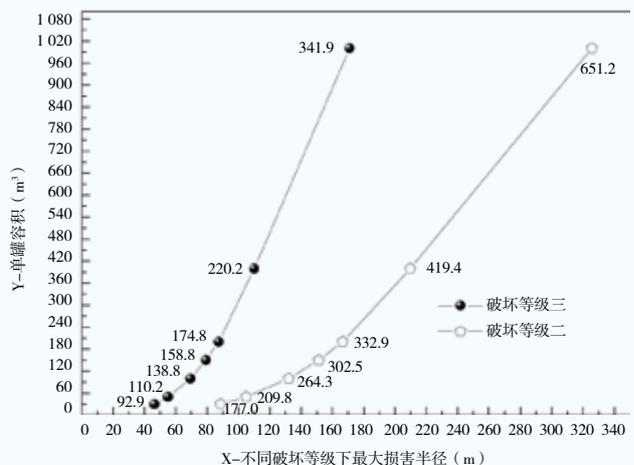
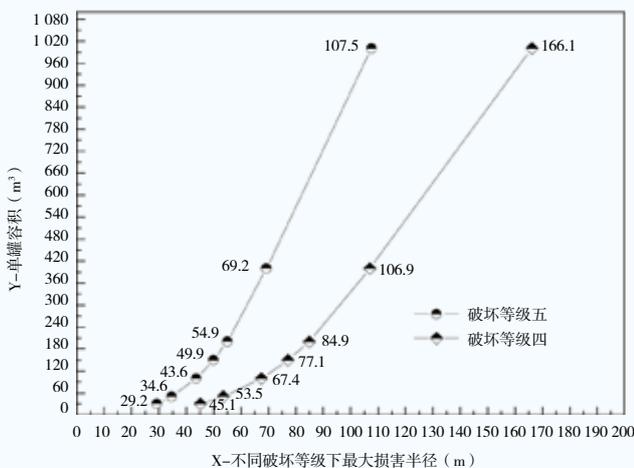


图2 不同破坏等级下最大损害半径与单罐容积关系图

(2) 超压-冲量准则对单罐容积 $30\text{m}^3$ 到 $1\ 000\text{m}^3$ 的LPG泄漏后形成的最大危险伤害半径进行模拟计算,当建筑物及人员在死亡半径以内时,建筑物毁坏,人员将受重伤至死亡;在轻伤半径以外,建筑及人员几乎不会受到爆炸冲击波的影响。

(3) 世界银行推荐危害关系式对单罐容积 $30\text{m}^3$ 到 $1\ 000\text{m}^3$ 的LPG泄漏后形成的最大危险范围进行模拟计算,在破坏等级五最大损害半径内,爆炸冲击波对建筑物、设备、人员等造成毁灭性破坏,在破坏等级三最大损害半径外,建筑物、设备、人员等几受到伤害相对较小,破坏等级二最大损害半径外为安全区域。因此,宜采用四级伤害半径作为LPG储罐建设安全间距选址的依据。

(4) 两种方法模拟计算的结果相对误差在6%左右,误差范围较小,因此模拟计算数据相对可靠。本文数据可供LPG储存站、储配站和灌装站的储罐布置防火间距参考。但实际工程中很多LPG储罐防火间距,受场地等各种条件因素的限制,达不到安全间距要求,为防止火灾爆炸危险事故的发生,应切实加强LPG储罐及相关设备的检修及维护工作,以降低泄漏事故发生的概率。

#### 参考文献

- 1 杜峰. 火灾环境下液化石油气储罐综合安全防护技术研究[J]. 工业安全与环保, 2010; 3(7): 26-27
- 2 邢志祥, 杨乃军, 郝永梅等. 高温环境下LPG储罐热响应及安全防护的研究进展[J]. 消防科学与技术, 2014; 33(9): 979-981
- 3 Zheng Bin, Chen Guohua, Liu Hui. Simulation experiment of hazardous properties of chemical tank fire [J]. Fire Science and Technology, 2014; 33(12): 1435-1439
- 4 郝彩霞, 许彦, 龚声武. 事故树分析法在LPG储罐火灾爆炸事故中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2012; 8(1): 154-159
- 5 郑斌, 陈国华, 刘晖. 化工储罐火灾危害特性模拟实验研究[J]. 消防科学与技术, 2014; 33(12): 1435-1439
- 6 Yan Jiawei, Wang Qing. Simulation on pool fire heat radiation in large scale oil tanks area [J]. Fire Science and Technology, 2012; 31(10): 1036-1040
- 7 Shi Shaoshuai, Liu Xiaolong. Evaluation on Leakage Accident Result of Large LNG Storage Tank [J]. Safety Health & Environment, 2014; 14(12): 48-56

### 安全管理消息

## 潍坊港华公交LNG加气站开展应急演练

2016年6月23日上午,潍坊港华公交LNG加气站针对LNG突发泄漏进行了一场别开生面的实战应急演练。此次演练是潍坊港华燃气有限公司、潍坊公共交通总公司、潍坊港华公交压缩天然气有限公司联合经济区市政局、北城街道办事处、消防特勤中队、经济区安监局、经济区公安分局、经济区卫生和计划生育局、经济区文明办等多家单位进行的抢险救援综合演练。在经济开发区北外环路南侧、友爱路以西的港华公交LNG加气站,模拟两辆公交车同时在站内两个加液机加液,在加液过程中,一辆公交车加液管路突然发生LNG泄漏,冻伤现场操作人员手臂并引发火灾,严重威胁站区和周围安全为背景,进行实战演练。

2016年6月是全国第15个“安全生产月”,为进一步完善应急抢险救援预案,由潍坊港华燃气有限公司、潍坊公共交通总公司和潍坊港华公交压缩天然气有限公司3方决定在港华公交LNG加气站联合开展此次演练。

潍坊港华公交LNG加气站是经山东省住建厅正式审批,在2015年投资建设的,是潍坊城区首个LNG加气站。作为未来新能源的LNG,加气站的员工必须对其全面了解和熟悉,包括一些紧急情况的处理,所以在此次安全月来临之际,3方特意联合组织了此次LNG加气站的实战演练。希望这次演练能提高员工的安全意识、锻炼员工的应急能力,为加气站的运营提供更加可靠的安全保障。(王洪霞)