# LNG 地面泄漏蒸发速率的计算

王 琳<sup>1,2</sup> 季 洁<sup>1,2</sup> 贺宝龙<sup>1,2</sup> 潘旭海<sup>1,2</sup>

南京工业大学城市与工业安全重点实验室,江苏 南京 210009;
 2.上海建科工程咨询有限公司,上海 200032

摘 要:分析评估 LNG 地面泄漏的危险性需要对其地面扩散和蒸发速率的变化进行准确预测。利用液体扩散的动力学模型和热传递模型,采用微分方法对 LNG 在连续性泄漏情况下液池扩散半径及蒸发速率随时间的变化关系进行研究,结果表明 LNG 蒸发速率先随时间线性增加到最大值,然后与时间的平方根成反比逐渐降低,并对实际泄漏情况下的泄漏速率、蒸发速率、液池扩散半径变化以及堤防中低温液体质量和液池厚度变化进行了准确计算。该研究结果对 LNG 地面泄漏事故发生后应急措施的采取和人员疏散等具有参考意义。

关键词:扩散;热传递;模型;蒸发速率 DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2014.05.008

## 0 前言

液化天然气 (LNG) 是一种优质、高效的清洁能源, 但在储存、运输和使用过程中有可能发生泄漏,迅速蒸 发并与空气混合形成易燃易爆、不断扩散的蒸汽云团印, 对周围安全造成严重的威胁。 LNG 泄漏后与地面发生 热传递并不断蒸发,最初产生的蒸汽温度很低,密度大 于周围空气并沿地面向下风向扩散,随着空气卷吸和热 辐射影响,蒸汽的温度升高,密度开始降低,气体达到正 浮力状态向下风向扩散<sup>[2]</sup>。国内外对 LNG 泄漏扩散、蒸 发进行了大量的实验和数值模拟研究并取得成果[3-6],但 以往蒸发速率的计算仅仅是利用一维傅里叶导热方程 计算热通量的变化,没有考虑液池扩散半径变化对热传 递的影响,实际上两者是一个相互耦合的过程,液池扩 散半径变化导致热流密度变化,单纯依赖一维傅里叶导 热方程,只能片面认为液池的蒸发速率很大,实际情况 是先随时间线性变化达到最大值,然后蒸发速率随时间 的平方根成反比逐渐降低。本文利用微分方法结合液体 扩散模型和热传递模型对最大蒸发速率以及蒸发速率 随时间的变化进行准确预测,并结合实际算例对液池扩

散半径、蒸发速率,以及液体质量、液池厚度随时间变化 关系进行计算,研究 LNG 泄漏、扩散蒸发过程有助于 LNG 泄漏危险性的评估,对泄漏事故后应急反应、人员 疏散等具有重要意义。

### 1 LNG 地面扩散及热传递计算

1.1 LNG 液体泄漏速率的计算

LNG 泄漏速率<sup>[7]</sup>:

$$Q = C_{\rm d} D \rho_{\rm L} \sqrt{\frac{2(p-p_0)}{\rho} + 2gh}$$
(1)

式中:Q为 LNG 质量流率,kg/s; $\rho_L$ 为 LNG 的密度, $kg/m^3$ ; D 为泄漏孔面积,  $m^3$ ;p为容器内介质的压力,Pa; $p_0$ 为 环境压力,Pa; $C_d$ 为流量系数。表 1 给出了不同形状泄漏 口的流量系数值。

表 1 不同形状泄漏口的流量系数

雷诺数	漏孔形状			
	圆形	三角形	长条形	
>100	0.65	0.60	0.55	
≤100	0.50	0.45	0.40	

收稿日期:2014-04-20

基金项目:江苏省自然科学基金青年基金资助项目(SBK 201241828);教育部博士点基金资助项目(20113221120010)

作者简介:王 琳(1987-),男,安徽亳州人,助理工程师,硕士,主要从事水幕作用下 LNG 泄漏扩散动力学机理研究、高倍消防 泡沫覆盖下 LNG 与周围环境传热传质过程研究。

## 1.2 LNG 地面扩散半径变化

Britter<sup>[8]</sup>得出在连续性泄漏情况下,液体在无障碍阻 挡时沿泄漏中心向周围扩散,扩散半径随时间变化的关 系见式(2):

$$R(t) = \left(\frac{g_{\upsilon_0}}{2\pi}\right)^{V_4} t^{\frac{3}{4}}$$
(2)

式中:R为扩散半径,m;v0为LNG体积流率,m3/s;t为泄 漏时间.s。

## 1.3 LNG 地面热传递模型建立

由于太阳辐射热和周围环境热用来加热低温的蒸 汽,LNG 液池蒸发所需要的热量由地面传给液体, 对蒸 发速率计算做以下假设:

- •热传递利用一维傅里叶导热方程;
- ●地面是平坦和光滑的:
- •储罐尺寸与堤防尺寸比起来很小;

•随着液池的扩散,热边界层厚度不断增加。

LNG 与地面发生热传递,热流密度计算<sup>[9]</sup>见式(3):

$$q(t) = \frac{\lambda \Delta T}{\sqrt{\pi \alpha t}} \tag{3}$$

式中:q 为热流密度, J/m<sup>2</sup>·s; $\lambda$  为地面热导率, W/m;  $\Delta T$ 为LNG与地面温差, K;  $\alpha$ 为热扩散率, m<sup>2</sup>/s。

在热传递过程中,热边界层的厚度随时间变化:

$$\delta = \sqrt{\pi} \alpha t \tag{4}$$

式中: $\delta$ 为热边界层的厚度,mm;

LNG 蒸发通量计算<sup>[10]</sup>见式(5):

$$V_{\rm L} = \frac{\lambda \Delta T}{{\rm H}_{\rm V} \sqrt{\pi \alpha t}} = \frac{s}{\sqrt{t}}$$
(5)

式中:VL为蒸发速率,kg/s;Hv为LNG蒸发热,J/kg。

式(5)中s包含了地面物理参数,其方程见式(6):

$$s = \frac{\Delta T}{H_{\rm v}} \sqrt{\frac{\left(\lambda \rho_{\rm s} H\right)_G}{\pi}} \tag{6}$$

式中: $H_v$ 为地面比热, J/(kg·K);  $\rho_s$ 为地面密度, kg/m<sup>3</sup>。

从式(5)可以看出 LNG 泄漏初期的蒸发速率很大, 实际情况是在蒸发一定时间之后随时间平方根成反比 变化[11]。

## 2 蒸发速率计算

#### 2.1 初始蒸发速率计算

为了得到整个液池 t 时刻内的平均蒸发速率, 需要 考虑液池在每一个积分单元 dA 在 dt 时间内的蒸发速 率,下面采用微分法对整个液池的蒸发速率在 ndt 时间 内进行计算:

对于第一时间段 dt 内:

$$V_{\rm L1} = \mathrm{d}A_1 \frac{s}{\sqrt{t}} \tag{7}$$

式中:A 为液池扩散面积,m<sup>2</sup>。

对于第二时间段 2 dt 内,此时第一时间段内蒸发速 率降低  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ :

$$V_{L2} = dA_1 \frac{s}{\sqrt{2dt}} + dA_2 \frac{s}{\sqrt{dt}}$$

$$-\Re f \mathcal{R} \nabla, \ \exists t = ndt \ \forall : \qquad (8)$$

$$V_{\rm Ln} = dA_1 \frac{s}{\sqrt{ndt}} + dA_2 \frac{s}{\sqrt{(n-1)dt}} + \dots + dA_n \frac{s}{\sqrt{dt}}$$
(9)

解式(9)需求出液池面积随时间变化的关系,利用 式(2)得出液池面积随时间变化的关系,任意时间段内 液池的面积 dA<sub>n</sub>为:

$$dA_n = \frac{3}{4} (2\pi g v_0)^{\frac{1}{2}} \sqrt{n dt} dt$$
 (10)

$$V_{Ln} = sC \left[ \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{n}} + \frac{\sqrt{2}}{(n-1)} + \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{(n-2)}} + \dots + \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{1}} \right] \frac{t}{n} \quad (11)$$
  
为了简便,式(11)中

$$C = \frac{3}{4} (2\pi g v_0)^{\frac{1}{2}} , \Leftrightarrow S_n = \int_1^n \frac{\sqrt{x}}{\sqrt{n+1-x}} dx ,$$
  
对式(11)进行积分得:  

$$S_n = \left[ \tan^{-1} \sqrt{n} - \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{n}} (n+1) \right], \quad \forall \mp n \; \text{远大} \mp 1 ,$$
  

$$S_n = \left( \frac{\pi}{2} - 0 \right) n .$$
  
式(11)化为:  

$$V_{\text{LN}} = sC \frac{\pi}{2} t_c$$
(12)

式(12)显示,对于连续性泄漏,液池蒸发的速率开始 并不是无限大,而与时间成正比,计算比例因数值为0.6。

(12)

## 2.2 最大蒸发速率计算

当液体扩散受到堤防限制时,液池半径等于堤防半 径,由式(2)计算液池前沿扩散到堤防的时间 t<sub>e</sub>,代入式 (12)计算液池最大蒸发速率 V<sub>max</sub>。此后液池的蒸发速率 会逐渐降低,且与时间的平方根成反比。

当液池扩散不受堤防限制时,液池在扩散过程中蒸 发速率不断增大,当蒸发速率与泄漏速率相等时,利用 式(13)计算此时时间 t<sub>d</sub>,代入式(2)得液池最大半径 r<sub>max</sub>, 见式(14)。

$$V_{\max} = sC\frac{\pi}{2}t_c \tag{13}$$

$$\frac{1}{max} = \frac{\rho_{\rm L}^{3/4} v_0^{3/8}}{g^{1/8} s^{3/4}}$$
(14)

第 32 卷 第 5 期 OIL AND GAS TREATING AND PROCESSING 油气加工

31

### 3 实际算例

#### 3.1 泄漏率计算

民用 LNG 汽车加气点和民用燃气气化站 LNG 储罐 容积一般为 5~50 m<sup>3</sup>, 压力为 0.6、0.8、1.2 MPa。本文以 5 m<sup>3</sup> LNG 圆柱形储罐为例, 半径 1 m, 储罐高度 1.6 m, 储 罐内压力 0.8 MPa, 假设泄漏口为圆形, 泄漏孔面积为 0.02 m<sup>2</sup>, 雷诺数小于 100, 流量系数为 0.50, 初始液位距 泄漏口高度为 1 m, 在泄漏过程中假设储罐内压力不变, 利用式(1) 计算 LNG 泄漏速率为 19.92 kg/s, 泄漏口以上 LNG 质量计算公式为:

$$m_a = \frac{h}{h_0} \times m_0 \tag{15}$$

式中: $m_a$ 为泄漏口以上 LNG 质量,kg;  $m_0$ 为开始储罐中 LNG 质量,kg; h为泄漏口以上的液位高度,m;  $h_0$ 为刚开 始的液位高度,m。

由以上计算知泄漏口以上 LNG 质量为 1 375 kg,由 泄漏速率和泄漏质量计算 LNG 泄漏至泄漏口所需要的 时间 *t* =69 s。

#### 3.2 液池扩散半径和蒸发速率计算

根据泄漏速率和蒸发速率相等,利用式(1)、(13)计 算到达最大蒸发速率时间 t<sub>e</sub>=33 s,此时液池半径最大, r<sub>max</sub>=7 m,图1显示了液池扩散半径与时间的变化关系, 液池半径随时间逐渐增大。



利用式(13)、(5)对蒸发速率进行预测,图2显示出 液池蒸发速率从刚开始随时间线性变化到达到最大值, 然后随时间逐渐降低。

在达到最大半径之前液池蒸发速率随时间呈线性 变化,达到最大半径之后液池蒸发速率与时间平方根成 反比,开始下降,而且刚开始下降很快,主要由于液池扩 散受阻,随后下降很慢,主要因为液池与地面之间的温 差趋于稳定,蒸发速率趋于稳定。



#### 3.3 堤防中液体质量和液池厚度计算

假设堤防的半径等于液池扩散的最大半径,当液池 前沿达到堤防边缘时,液体扩散受到堤防阻止,液池的 蒸发速率开始与时间的平方根成反比。由于泄漏速率不 变,蒸发速率小于泄漏速率,堤防中 LNG 慢慢积聚,液池 厚度上升。以下对液池中 LNG 质量和液池厚度变化进行 预测。LNG 从刚开始泄漏至达到堤防边缘时间 t<sub>1</sub>为 0~ 33 s,液池中剩余 LNG 的质量变化为:

$$M_1 = Q \cdot t_1 - \int_0^{t_1} sC \frac{\pi}{2} dt = 19.92 t_1 - 0.3 t_1^2$$
(16)

式中: $M_1$ 为液池中剩余 LNG 的质量变化,kg; $t_1$ 为 LNG 从刚开始泄漏至达到堤防边缘时间,s。

*t*=33 s 时液池中 LNG 的质量 *M*<sub>33</sub>=330.7 kg。34~69 s 液池中 LNG 的质量变化为 *M*<sub>2</sub>:

$$M_{2} = M_{33} + Q \cdot t_{2} - \int_{t_{1}}^{t_{2}} \frac{19.92}{\sqrt{t}} dt = 19.92 t_{2} - 39.84 \sqrt{t} + 330.7$$
(17)

式中: $M_2$ 为 34~69 s 液池中 LNG 的质量变化; $t_2$  为液体 蒸发速率从开始下降直至液体泄漏完全的时间 (34~69 s);式(18)用来计算液池的厚度。

$$d = \frac{M}{\rho_{\rm L} \,\pi \,r_{\rm max}^2} \tag{18}$$

式中:M为LNG质量, kg;d为液池液位厚度, mm。

由式(16)、(17)得出堤防中 LNG 的质量随时间变化 关系,见图 3,34 s 之前堤防中 LNG 质量增加的速率较 慢,主要因为达到最大半径之前液体的蒸发速率是逐渐 增加的,而在 34 s 之后,由于蒸发速率降低,堤防中 LNG 质量积聚速率比 33 s 之前快。

图 4 显示了液池厚度时间的变化关系,当液池半径 达到堤防半径之后,蒸发速率开始下降,堤防中 LNG 质 量逐渐增加,液池的厚度也逐渐增加。



本文对 LNG 蒸发速率随时间变化进行了计算,结果 表明 LNG 液池初始蒸发速率并非无限大,而是先随时间 线性变化到最大值,然后与时间平方根成反比逐渐降 低。对 LNG 蒸发速率的准确预测,有助于 LNG 泄漏事故 的危险性分析和评估,对 LNG 地面泄漏事故发生后应急 措施的采取和人员疏散等具有参考意义。

参考文献:

[1] 苑伟民,袁宗明. LNG 泄漏扩散模拟研究[J]. 天然气与石油, 2011, 29 (4):1-5.

Yuan Weimin, Yuan Zongming. Study on LNG Leakage and Diffusion Simulation [J]. Natural Gas and Oil, 2011,29 (4): 1–5.

[2] 庄学强,廖海峰.液化天然气泄漏扩散模型分析[J]. 集美大 学学报,2011,16(4):293-296.

Zhuang Xueqiang, Liao Haifeng. Analysis on Numerical Model of Liquefied Natural Gas Leakage Diffusion[J]. Journal of Jimei University, 2011, 16(4):293–296.

[3] 高 露,梁光川.液化天然气的泄漏防护[J]. 天然气与石油, 2008,26(1):28-30. Gao Lu, Liang Guangchuan.Liquefied Natural Gas Leakage and

Protection[J]. Natural Gas and Oil, 2008, 26(1): 28–30.

- [4] 孙 标,郭开华. 液化天然气水平连续性泄漏重气的扩散过程[J]. 天然气工业, 2010, 30(7):110-113.
  Sun Biao, Guo Kaihua. Effects on LNG Dense Gas Dispersion and the Exclusive Distance for Safety [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(7):110-113.
- [5] Middha P, Ichard M, Arntzen B J. Validation of CFD Modelling of LH<sub>2</sub> Spread and Evaporation Against Large –scale Spill Experiments [J]. International Journal of Hydrogen En<sup>-</sup>ergy, 2011, 3(36): 2620–2627.
- [6] Anay L H. A review of Large-scale LNG Spills Experiments and Modeling [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006,6 (13):119-140.
- [7]周 超,王志荣.立式储罐液体泄漏过程的模拟实验[J].油 气储运,2011,3(4):310-313.

Zhou Chao, Wang Zhirong. Simulation Experiment on the Process of vertical Storage Tank Liquid Leakage[J].Oil and Gas Storage and Transportation, 2011, 3(4):310–313.

- [8] Britter R E. The Spread of Negatively Buoyant Plume in a calm Environment [J]. Atmospheric Environment, 1979,13: 1241–1247.
- [9] Keiji, Takeno. Evaporation Rates of Liquid Hydrogen and Liquid Oxygen Spilled onto the Ground [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1994,7(5): 425–431.
- [10] Jensen N. On Cryogenic Liquid Pool Evaporation [J]. Journal of Hazardous Materials, 1983,3(1):157–183.
- [11] Verfonderna, Dienhartb. Pool Spreading and Vaporization of Liquid Hydrogen [J]. Internatioal Journal of Hydrogen Energy, 1997, 22(7):649–660.