

文章编号: 1672— 6952(2011)02— 0027— 05

城镇燃气管道泄漏扩散模型及数值模拟

程浩力<sup>1,2</sup>, 刘德俊<sup>1\*</sup>

(1. 辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁抚顺 113001;  
2. 中国石油集团工程设计有限责任公司北京分公司, 北京 100085)

**摘 要:** 城镇燃气管道的分布区域人口及建筑众多, 燃气管道一旦发生泄漏, 将有可能造成重大的财产损失甚至人员伤亡。因此, 为了量化城镇燃气泄露危害, 针对管道不同的破坏情况及气源建立了燃气泄漏各种源模型以及扩散模型, 并且建立了燃气管线动态泄漏扩散模型及伤害性危险范围。对第三方破坏所造成的城镇燃气管道泄漏模型进行了模拟, 采用 CFD 技术对管道泄漏燃气的扩散进行模拟研究, 获得了泄漏气体的扩散数值模拟结果, 为城镇燃气管道安全运行提供了理论依据。

**关键词:** 燃气管道; 泄漏; 城镇; 泄漏模型; 扩散模型; 第三方破坏; 数值模拟  
**中图分类号:** TE88; TU 996; X913      **文献标识码:** A      doi: 10.3696/j.issn.1672— 6952.2011.02.009

Numerical Simulation of City Gas Pipeline Leakage and the Release and Dispersion Model

CHENG Hao—li<sup>1,2</sup>, LIU De—jun<sup>1\*</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun Liaoning 113001, P. R. China;  
2. China Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing Company, Beijing 100085, P. R. China)

Received 25 October 2010; revised 20 December 2010; accepted 5 March 2011

**Abstract** The areas that city gas pipelines distributed in always crowd with people and buildings and once gas releases through damaged pipes, accidents would happen involving substantial economic losses and even victims amongst the population. Therefore, in order to quantify the hazards of city gas leak, different leakage and diffusion models were established according the characters of gas and the damage. The diffusion model of unsteady leakage of gas pipeline and the damaging and destroying areas were established. Based on the computational fluid dynamics(CFD) technique the diffusion range of leaked gas during accident of underground gas pipeline that caused by the third party damage was studied. According to the results, the dispersion of the leaked gas was obtained and provide the theory basis for safety operation of city gas pipelines.

**Key words:** Gas pipelines; Leakage; City; Leakage model; Diffusion model; The third party damage; Numerical simulation  
\* Corresponding author. Tel.: +86— 413— 6861820; e— mail: ldj@126.com

由于管道老化、腐蚀、管材和焊缝缺陷等原因, 尤其是随着市政建设的发展, 城镇内违章施工挖断、压裂燃气管道的事故屡见不鲜, 泄漏事故频发, 引发火灾及爆炸事故, 造成人员伤亡及环境污染的恶劣后果。燃气管道泄漏扩散的危险性主要在于两个方面: 一是一定区域内燃气浓度达到阈值, 使人员中毒; 二是一定区域内燃气浓度达到爆炸极限, 范围内发生火灾或爆炸事故。针对这种情况, 本文根据不同条件建立了相应适用的管道泄漏率模型, 并应用

模拟管道温度场<sup>[1]</sup>及泄漏<sup>[2]</sup>的 CFD 方法进行了城燃管道泄漏模拟。

1 模型分析

1.1 燃气泄漏源模型

泄漏速率的确定是分析泄漏扩散及评价事故后果的基础, 其依据的主要模型根据泄漏孔径大小分别为小孔泄漏模型、管道模型和大孔泄漏模型。总的来说, 腐蚀穿孔容易发生小孔径泄漏事故, 而对于外力破坏(诸如施工、自然灾害等)大孔径泄漏事故发生的可能性较大。

1.1.1 孔口泄漏 小孔泄漏模型适用于穿孔泄漏

的情形,穿孔泄漏是指管道或设备由于腐蚀等原因形成小孔,燃气从小孔泄漏。对于理想气体等熵膨胀任意点处的质量流率<sup>[3]</sup>:

$$Q = C_0 A P_2 \sqrt{\frac{2M}{RT_2} \frac{k}{k-1} \left[ \left( \frac{P_a}{P_2} \right)^{2/k} \left( \frac{P_a}{P_2} \right)^{(k+1)/k} \right]} \quad (1)$$

式中,  $Q$  为气体通过孔洞的质量流量,  $\text{kg/s}$ ;  $C_0$  为气体泄漏系数, 一般取值范围在 0.6 ~ 1.0。当裂口形状为圆形时取 1.00, 三角形时取 0.95, 长方形时取 0.90, 孔口为内层腐蚀形成的渐缩孔(钝角入口)取  $0.9 < C_0 < 1.0$ , 孔口为外力机械损伤形成渐扩孔(钝角入口)取  $0.6 < C_0 < 0.9$ <sup>[4]</sup>;  $A$  为孔洞面积,  $\text{m}^2$ ;  $P_2$  为泄漏口处对应管道中心点位置压强,  $\text{Pa}$ ;  $M$  为气体摩尔质量,  $\text{kg/mol}$ ;  $k$  为气体的热容比,  $k = C_p/C_v$ ;  $R_g$  为理想气体常数,  $8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ ;  $T_2$  为泄漏口处对应管道中心点位置气体温度,  $\text{K}$ ;  $P_a$  为环境压强,  $\text{Pa}$ 。

从安全工作的角度考虑, 都需要通过孔洞流出蒸汽的最大流量。引起最大流速的压力比为:

$$\frac{P_c}{P_{2c}} \leq \left( \frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} \quad (2)$$

塞压  $P_c$  是导致孔洞或管道流动最大流量的下游最大压力(临界压力), 其泄漏量为:

$$\begin{cases} T_2 = \left( \frac{Y_1}{Y_2} \right) T_1, P_2 = \left( \frac{Ma_1}{Ma_2} \right) \sqrt{\frac{Y_1}{Y_2}} P_1 \\ G = \left( \frac{A}{A_0} \right) P_2 \sqrt{\frac{2M}{RT_2} \frac{k}{k-1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)}} = Ma_1 P_1 \sqrt{\frac{2M}{RT_1}} = Ma_2 P_2 \sqrt{\frac{2M}{RT_2}} \\ \frac{k+1}{2k} \ln \left[ \frac{Ma_2^2 Y_1}{Ma_1^2 Y_2} \right] + \frac{(A_0/A)^2}{k[2/(k+1)]^{(k+1)/(k-1)}} \left( 1 - \frac{Ma_2^2}{Ma_1^2} \right) + \left( \frac{4fL_e}{D} \right) = 0 \\ Q = A P_2 \sqrt{\frac{2M}{RT_2} \frac{k}{k-1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)}} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $f$  为管道摩擦系数(无量纲);  $L$  为管道当量长度,  $\text{m}$ ;  $D$  为管道直径,  $\text{m}$ ;  $A_0$  为管道截面积,  $\text{m}^2$ ;  $G$  为气体的质量流速,  $\text{kg/s}$ ; 下标 1 为起始点, 2 为泄漏中心点; 其他符号同上。

$$\begin{cases} \frac{k+1}{2k} \ln \left[ \frac{2Y_1}{(k+1)Ma_1^2} \right] + \frac{(A_0/A)^2}{k[2/(k+1)]^{(k+1)/(k-1)}} \left( 1 - \frac{1}{Ma_1^2} \right) + \left( \frac{4fL_e}{D} \right) = 0 \\ Q = A Ma_1 P_1 \sqrt{\frac{2M}{RT_1} \frac{k}{k-1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)}} \end{cases} \quad (6)$$

1.1.4 动态泄漏 在实际情况下, 当泄漏事故发生一定时间之后, 气源将会被自动控制阀或管理人员手动关闭, 从而使得泄漏呈现出逐渐降低, 最终停止的稳态泄漏过程。气源切断后管内仍存有一定体积的气体, 根据质量守恒方程可以得到此时动态泄漏率的表达式为<sup>[8]</sup>:

$$(Q_m)_c = C_d A P_2 \sqrt{\frac{2M}{RT_2} \frac{k}{k-1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)}} \quad (3)$$

1.1.2 管道泄漏 管道泄漏模型适用于开裂泄漏的情形。开裂泄漏的原因通常是由于外力干扰或超压破裂, 属于大面积泄漏, 泄漏口面积通常为管道截面积的 80% ~ 100%<sup>[5]</sup>。开裂泄漏瞬时泄漏量大, 导致管道中的压力明显降低。对于理想气体绝热管道流, 声速和非声速情况下的质量通量都可以用 Darcy 公式<sup>[6]</sup>表示:

$$G = \frac{m}{A} = Y_g \sqrt{\frac{2g_c \rho_1 (P_1 - P_2)}{\sum K_f}} \quad (4)$$

式中,  $G$  为质量通量;  $m$  为气体的质量流率,  $\text{kg/s}$ ;  $A$  为孔面积,  $\text{m}^2$ ;  $Y_g$  为气体膨胀系数;  $g_c$  为重力常数;  $\rho$  为上游气体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $P_1$  为上游气体压力,  $\text{Pa}$ ;  $P_2$  为下游气体压力,  $\text{Pa}$ ;  $\sum K_f$  为差损失项, 可用  $4fL/d$  替换,  $f$  为摩擦系数,  $d$  为内径,  $L$  为管长,  $\text{m}$ 。

1.1.3 大孔泄漏 对于高压输气管道, 气体的流动状态主要有两种<sup>[7]</sup>。

1) 当孔径较小时, 泄漏口中心点压力  $P_2$  稍小于起始点压力  $P_1$ , 且远远大于临界压力  $P_c$ 。

此时泄漏过程为管道内亚临界流、泄漏孔为临界流的等熵膨胀过程, 求解方程为:

2) 随着孔径进一步增大,  $P_2$  远远小于  $P_1$ , 但依旧大于临界压力  $P_c$ , 此时泄漏过程变为管道内与泄漏孔均为临界流的等熵膨胀过程, 求解方程为:

$$Q(t) = -V_0 \frac{d\rho(t)}{dt} \quad (7)$$

其中,  $V_P$  为管道体积,  $\text{m}^3$ ;  $\rho$  为密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ 。

当气源被关闭后, 起始点及沿程压力将会随着时间的变化逐渐降低。即使初始状态为临界流状态, 但经过一定时间之后, 孔口泄漏均会变成亚临界

流。从临界流转变为亚临界流的判别标准为式(2)。则临界时间,即由临界流状态转变为亚临界状态时间  $t_c$  为:

$$t_c = \frac{1}{\alpha} \left\{ \frac{1}{[(k+1)/2]^{1/2} (P_a/P_{20})^{(k-1)/2k}} - 1 \right\} \quad (8)$$

其中,  $\alpha = \frac{Q_0(k+1)}{2m_0}$ ;  $m_0$  为稳态时管内气体质量; 下标 0 表示稳态时各参数值。

根据临界流质量泄漏率式(3)及式(7)可得到在孔口泄漏为临界流状态下任意时刻的  $P$ 、 $T$ 、 $\rho$ 、 $Q$ 、 $m$  的计算关系式:

$$\begin{cases} \frac{P(t)}{P_0} = [F(t)]^{2k(k-1)} \\ \frac{T(t)}{T_0} = [F(t)]^2 \\ \frac{\rho(t)}{\rho_0} = [F(t)]^{2(k-1)} \\ \frac{Q(t)}{Q_0} = [F(t)]^{(k+1)(k-1)} \\ \frac{m(t)}{m_0} = 1 - [f(t)]^{2(k-1)} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $F(t) = \frac{1}{1 + \alpha t^\circ}$

根据式(1)及式(7)可以得到类似式(3)的解析解关系式。引入威尔森模型, 结合式(9)得到管道破裂的泄漏速率为<sup>[9]</sup>:

$$Q(t) = \frac{Q_0}{1 + m_0/(t_B Q_0)} \left\{ \frac{m_0}{t_B Q_0} \exp \left( \frac{-t}{t_B} \right) + \exp \left[ -t t_B \left( \frac{Q_0}{m_0} \right)^2 \right] \right\} \quad (10)$$

1.2 燃气泄漏及扩散模型

城镇燃气一般包括天然气、液化石油气和人工煤气。其中天然气及人工煤气密度大于空气, 泄漏后为浮性气体被动扩散; 液化石油气的气态密度比空气重, 泄漏后属于重气扩散。对于不同性质的气体需要应用不同的扩散模型。

1.2.1 中性浮力扩散 中性浮力扩散模型, 用于估算释放发生后释放气体与空气混合, 并导致混合气云具有中性浮力后下风向各处的浓度, 对于燃气管道泄漏一般用烟羽模型来描述。假定风向沿  $x$  轴, 风速恒定为  $u$ , Pasquill-Gifford 模型所描述的位于地面  $H$  高处的连续稳态源的烟羽的浓度为<sup>[10]</sup>:

$$\langle C \rangle(x, y, z) = \frac{G}{2\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \cdot \left\{ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (11)$$

式中,  $\langle C \rangle(x, y, z)$  为平均浓度,  $g/m^3$ ;  $G$  为连续泄漏率,  $kg/s$ ; 扩散系数  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$  分别代表下风向、侧风向和垂直方向  $(x, y, z)$  浓度的标准偏差;  $u$  为风速,

$m/s$ ;  $y$  为风向垂直方向距离,  $m$ ;  $z$  为距里面距离,  $m$ ;  $H$  为泄漏源高度,  $m$ 。

下风向地面上最大浓度出现的位置, 可由下式求得:

$$\sigma_z = H/\sqrt{2} \quad (12)$$

地面上沿  $x$  轴的最大浓度  $\langle C \rangle_{\max}$  由下式求得:

$$\langle C \rangle_{\max} = \frac{2G}{\pi u H^2} \left[ \frac{\sigma_z}{\sigma_y} \right] \quad (13)$$

1.2.2 重气扩散 密度大于其扩散环境空气密度的气体均称为重气, 现有的重气扩散模型大都是在箱模型(Box-Model)的基础上建立的。高斯模型和重气扩散箱式模型有很大的局限性。为了比较精确并贴近实际的模拟重气扩散, 人们采用计算流体力学(CFD)的方法模拟其扩散的三维非定常态湍流流动过程。泄漏燃气视为不可压缩流体, 其温度视为与环境温度相同, 选择  $k-\epsilon$  双方程模型, 则泄漏燃气的运动与扩散规律可由以下控制方程描述<sup>[11]</sup>。

连续性方程:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (14)$$

动量方程:

$$\rho \left( \frac{\partial U_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial U_j}{\partial x_j} \right) = g_i (\rho_a - \rho) - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (15)$$

$k-\epsilon$  双方程模型:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P + \epsilon \\ \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_i}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + \\ &\quad \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P - C_{\epsilon 2} P) \end{aligned} \quad (16) \quad (17)$$

物质守恒方程:

$$\rho \left( \frac{\partial C}{\partial t} + u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) = \Gamma \frac{\partial C}{\partial x_j \partial x_j} \quad (18)$$

式中,  $P = \nu_i \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$ ;  $\nu_i = C_\mu \frac{K^2}{\epsilon}$ ; 各系数的经验数值为:  $C_\mu = 0.09$ ,  $C_{\epsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\epsilon 2} = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。

上面方程采用统一的微分方程描述为:

$$\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \rho U_i \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right] + s \quad (19)$$

采取一定的离散方法将上式离散, 并根据具体情况构造边界条件解控制方程, 便可得到泄漏场所的燃气浓度分布和速度分布。在 FLUENT 等软件中建立泄漏场所几何模型, 选择动量方程模型、边界条件及其他已知参数, 便可自动计算。

1.3 爆炸危害

对蒸汽云爆炸(VCEs)进行定量评价的方法主

要有两种: TNT 当量法和 TNQ (Multi-Energy) 模型法, 这两种方法各有优缺点, 一般把这两种评价方法结合起来使用。蒸汽云爆炸主要因冲击波造成伤害, 因而按超压为冲量准则确定人员伤亡区域及财产损失区域<sup>[1]</sup>。

1.3.1 燃气爆炸能量 燃气体的 TNT 当量  $W_{\text{TNT}}$  及爆炸总能量  $E$  为:

$$W_{\text{TNT}} = \frac{\alpha W Q}{Q_{\text{TNT}}} \tag{20}$$

$$E = 1.8 \alpha W Q \tag{21}$$

式中,  $W_{\text{TNT}}$  为可燃气体的 TNT 当量, kg;  $\alpha$  为可燃气体蒸汽云当量系数 (统计平均值为 0.4);  $W$  为蒸汽云中可燃气体质量, kg;  $Q$  为可燃气体的燃烧热, J/kg;  $Q_{\text{TNT}}$  为 TNT 的爆炸热, J/kg;  $E$  为可燃气体的爆炸总能量, J; 1.8 为地面爆炸系数。

1.3.2 爆炸伤害半径 爆炸伤害半径  $R$  为:

$$R = C (NE)^{1/3} \tag{22}$$

式中,  $C$  爆炸实验常数, 取值: 0.03 ~ 0.40;  $N$  为有限空间内爆炸发生系数, 取 10 %。

## 2 实例模拟

### 2.1 模型建立

本文对燃气泄漏扩散过程进行数值模拟, 为了能得到具有指导意义的一般性规律, 需要从各种实例中抽象出一种有代表意义的模型。用三维模型建立燃气管道泄漏这样的超大空间计算量是巨大的, 因此, 采用 FLUENT 软件建立二维模型模拟分析, 模型区域如图 1 所示。

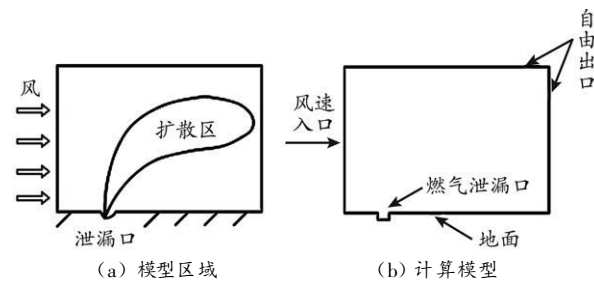


图 1 泄漏模型

### 2.2 FLUENT 扩散模拟

该管道埋于地下, 管道的内径 150 mm, 燃气及环境温度为 300 K, 泄漏口为 100 mm × 150 mm, 风速为 5 m/s, 环境压力  $1 \times 10^5$  Pa。泄漏孔面积为  $A = 0.015 \text{ m}^2$ , 燃气泄漏速度为  $v \approx 330 \text{ m/s}$ 。其中天然气采用甲烷, 液化石油气采用丙烷代替。

2.2.1 天然气泄漏模拟 风速为 4 m/s, 时间分别为 30、60、90 s 时天然气泄漏情况如图 2 所示。

由图 2 可知, 燃气泄漏时在泄漏口浓度最大, 浓度较大范围基本在下风向成半圆形, 并且高浓度区

离开地面。浓度为 0.35 的等值线在地面的距离分别为 26、40 及 42 m, 高度分别为 17、23 及 25 m。可以看出, 随着泄漏的进行, 相对较高的浓度区扩大速度变的缓慢。

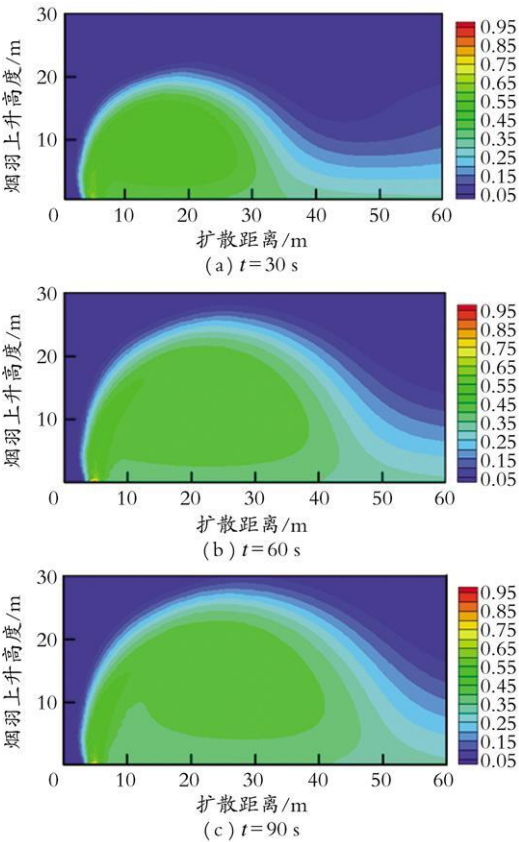


图 2 不同时刻天然气连续扩散浓度分布云图 (风速 4 m/s)

2.2.1 液化石油气泄漏模拟 风速为 1 m/s, 时间为 90 s 时液化石油气泄漏情况如图 3 所示。

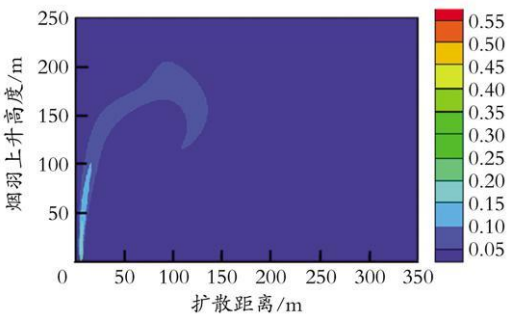


图 3 液化石油气扩散浓度分布云图 (风速 1 m/s,  $t = 90 \text{ s}$ )

风速为 4 m/s, 时间分别为 60、90 s 时液化石油气泄漏情况如图 4 所示。

由图 3 与图 4 相比可知, 风速对燃气的泄漏扩散情况占主导地位。风速较大时, 气体会向下风向扩散, 并且在竖直方向的扩散会受到抑制。

图 2(c)与图 4(b)比较, 在风速为 4 m/s 时天然气高浓度区明显比液化石油气范围大, 对于天然气, 浓度在 0.2 以上的区域几乎充满下风向半径为 55 m 的半圆区域内, 而液化石油气则基本集中在燃气的迎风面一侧。

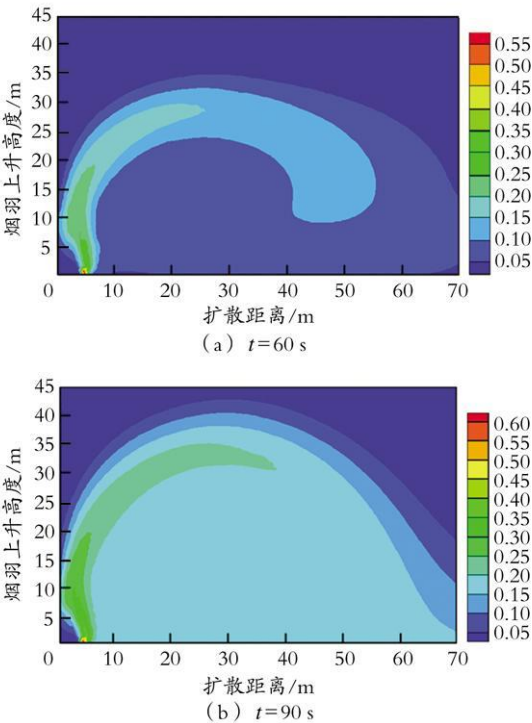


图 4 不同时刻液化石油气连续扩散浓度分布云图(风速 4 m/s)

3 结束语

大多数情况下, 几种泄漏模型可以结合起来使用, 取长补短。没有一种模型完美无缺, 随着技术的发展研究更加切合实际的模型将是管道泄漏模拟的发展方向, 也是对管道泄漏事故后果进行评价的迫切需要。

当燃气管道发生泄漏时, 应尽快切断气源。风速对气体扩散浓度有较大的影响, 泄漏气体主要向下风向扩散。离泄漏源越近, 浓度值越高且随风速的变化越小。在现场一旦发生天然气泄漏, 应综合考虑泄漏源的方向和该地点当时的风向、风速等因素, 及时准确预测泄漏气体可能扩散到危险区域, 做好应对措施。由于离泄漏源较近处气体浓度很大, 有中毒危险, 而较远处则处于爆炸极限范围, 所以抢险人员应该按可燃气体浓度的 25% 爆炸下限设置警戒线<sup>[12-13]</sup>, 禁止车辆、人员通行, 避免发生严重的后果。为安全起见, 设置警戒线时应以计算结果的最远警戒距离为准设置警戒圈。

参 考 文 献

[ 1 ] 马贵阳, 刘晓国, 郑平. 埋地管道周围土壤水热耦合温度场的数值模拟[ J ]. 辽宁石油化工大学学报, 2007, 27(1): 40—46.

[ 2 ] Cheng HaoLi, Liu Dejun. 3D CFD simulation of manufactured gas pipeline leakage and dispersion in urban areas[ A ]. Liu Jiongtian, Ni Weidou. Collected papers of forum on the second China energy scientist[ C ]. Irvine: Scientific research publishing, 2010.

[ 3 ] Crowl D A, Louvar J F. Chemical process safety fundamentals with applications [ M ]. New Jersey: Prentice—hall, 2001.

[ 4 ] 蔡增基, 龙天渝. 流体力学泵与风机[ M ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.

[ 5 ] 彭世尼, 周廷鹤. 燃气泄漏与扩散模型的探讨[ J ]. 煤气与热力, 2008, 28(11): 9—12.

[ 6 ] Crane Valve. Flow of fluids through valves, fittings & pipe TP—410 metriq [ M ]. Huntington Beach: Vervante, 1999.

[ 7 ] 冯文兴, 王兆芹, 程五一. 高压输气管道小孔与大孔泄漏模型比较分析[ J ]. 安全与环境工程, 2009, 16(4): 108—110.

[ 8 ] 张甫仁. 燃气管线动态泄漏扩散的危险性分析[ J ]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(2): 103—109.

[ 9 ] 王兆芹. 高压输气管道泄漏模型研究及后果影响区域分析[ D ]. 北京: 中国地质大学(北京)工程技术学院, 2009.

[ 10 ] AIChE/CCPS. Guidelines for chemical process quantitative risk analysis[ M ]. New York: Wiley—AIChE, 2000.

[ 11 ] 黄小美. 城市燃气管道系统风险评价研究[ D ]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2004.

[ 12 ] 汪元辉. 安全系统工程[ M ]. 天津: 天津大学出版社, 1999.

[ 13 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50493—2009 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计规范[ S ]. 北京: 中国计划出版社, 2009.

(Ed.: ZW, Z)