

城市燃气管道风险评估中失效后果的计算^{*}

孙永庆 钟群鹏(中国工程院院士) 张 峰

(北京航空航天大学材料科学与工程学院)

孙永庆等.城市燃气管道风险评估中失效后果的计算.天然气工业,2006,26(1):120-122.

摘 要 对城市燃气管道进行风险评估进而实现风险管理是保证燃气管道安全运行、提高管道公司经济效益的科学管理方法。风险评估的过程中需要对燃气管道的失效后果进行准确的评价和计算,为此在对燃气泄漏、扩散、破坏和损伤模式的各种理论进行总结的基础上,使用 Matlab 软件对燃气扩散模式进行了模拟,确定了影响燃气扩散浓度的主要因素;确定了燃气燃烧和爆炸的损失破坏标准等多方面的内容;通过实例计算,简要介绍了燃气管道失效后果的主要计算方法;并通过 Matlab 软件对燃气扩散模式的模拟,对影响燃气扩散的主要因素进行了定性分析。

关键词 城市 燃气 管道 风险分析 评估 失效后果 计算 Matlab 软件

燃气管道的风险评估可以分为管道的失效可能性计算和失效后果计算两大部分。笔者在总结国内外对风险后果计算模式的基础上,使用 Matlab 方法对燃气扩散模式进行了模拟,并通过实例计算,提出了燃气管道失效后果计算的主要方法,对影响燃气扩散的主要因素进行了敏感性分析,还针对我国当前燃气行业的管理特点,提出了在我国进行燃气管道风险评估失效后果计算中所需要注意的问题。

一、燃气管道失效后果的计算过程^[1,2]

燃气管道事故造成的失效后果一般可以从以下方面进行计算:①燃气泄漏引发火灾、爆炸造成管道周围人员伤亡和财产损失;②燃气泄漏造成的介质损失、管道修理费用、停止输气造成的直接经济损失等;③对管道周围的环境破坏以及其他间接经济损失。由于介质损失、修理费用、停输损失等相对比较容易估算,环境损失和间接经济损失可通过专家评估的方法进行大致估计,因而在此主要讨论人员伤亡和财产损失的计算。

与燃气泄漏相关的人员伤亡和财产损失的计算涉及到燃气泄漏的形式、扩散模式、损伤模式等多方面内容。

1.燃气泄漏模型

通常情况下燃气均以气体的形式泄漏出来,泄

漏强度为:

$$Q = C_d A p \sqrt{\left(\frac{M\gamma}{RT_g}\right) \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \quad (1)$$

式中: C_d 表示泄漏系数,取 1.0; A 表示泄漏孔面积; p 表示燃气压力; M 表示燃气分子量; γ 表示绝热指数; R 表示气体常数; T_g 表示气体温度。

2.燃气扩散模式

对于密度小于空气或与空气密度相似的气体,高斯烟羽或烟团的模式得到了广泛应用。一般情况下燃气为连续扩散,适用高斯烟羽模式,气体浓度为 C :

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

式中: x, y, z 表示离开泄漏源的距离; Q 表示泄漏源强度; u 表示风速; σ_y, σ_z 分别表示顺风、侧风、垂直风扩散系数。

3.燃气火灾爆炸损伤模式

根据以往发生的事故和研究的结果,燃气泄漏发生火灾爆炸的主要形式如下。

(1)火球(fire ball)。燃气在泄漏后如果在尚未与空气充分混合即被点燃,属于扩散性的燃烧,即形成球形或半球形的火体,称为火球。火球能够产生强烈的热辐射,对管道周围人员和财产构成伤害热辐射的计算公式为:

^{*} 本文为国家“十五”科技攻关课题资助项目(专题号:2001BA803B03-01)研究成果。

作者简介: 孙永庆,1978年生,博士研究生,研究方向为机械(含构件)的失效分析及预测预防。地址:(100083)北京市北京航空航天大学 10-11 信箱。电话:(010)82317108,13681029155。E-mail:y.q.sun@sina.com

$$q(x) = \frac{Q_{total} T_c}{4\pi x^2} \tag{3}$$

式中： q 表示入射辐射剂量； Q_{total} 表示火球的总辐射量； T_c 表示热传导系数； x 表示伤害半径。

(2)喷射火焰 (jet fire)。燃气从破裂的开口或管路喷射出而被引燃的火焰，即成为喷射火焰。其热辐射计算公式为：

$$I(x) = \frac{\eta H_c Q_0 T_{jet}}{4\pi x^2} \tag{4}$$

式中： I 表示入射热辐射强度， W/m^2 ； η 表示效率因子； H_c 表示甲烷燃烧热； Q_0 表示天然气的泄漏流量， kg/s ； T_{jet} 表示辐射率系数； x 表示目标距离火焰区中心的距离， m 。

(3)闪火 (flash fire)或蒸气云爆炸 (UVCE)。大量燃气迅速泄漏到空气中会形成蒸气云，若点燃时蒸气云质量不足，或火源能量不高，则产生闪火；反之则易产生爆炸，产生冲击波。闪火热辐射的计算与火球公式相同，但应取燃气的低热值进行计算，而蒸气云爆炸则还需要计算冲击波造成的危害。冲击波超压的计算公式为：

$$m_{TNT} = m_d \Delta H_d / Q_{TNT} \tag{5}$$

式中： m_{TNT} 表示 TNT 当量； m_d 表示参与爆轰的天然气的质量； ΔH_d 表示燃气的爆热，可用燃烧热表示； Q_{TNT} 表示标准 TNT 爆源的爆热值。

对于质量为 m_{TNT} 的标准爆源，在地面发生爆炸，则其爆炸场超压可以描述如下^[3]：

$$\Delta p = 1.02 \left| \frac{\sqrt[3]{m_{TNT}}}{r} \right| + 3.99 \left| \frac{\sqrt[3]{m_{TNT}}}{r} \right|^2 + 12.6 \left| \frac{\sqrt[3]{m_{TNT}}}{r} \right|^3 \tag{6}$$

式中： r 表示某点至爆源的距离， m ； m_{TNT} 表示 TNT 的药量， kg ； Δp 表示爆炸波的入射超压， MPa 。

图 1 简要说明了燃气泄漏后事故的发展过程。

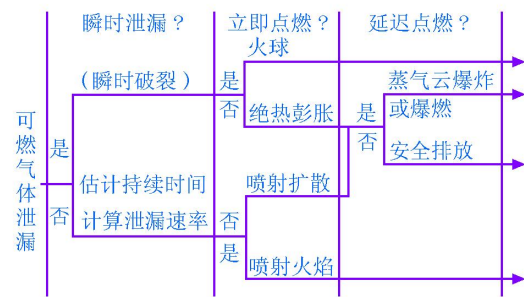


图 1 燃气泄漏后事故发展的过程示意图

4.各种扩散模式的发生概率

API 581 提供了燃气发生泄漏后各种表现形式的概率以供参考，研究者可以根据不同情况对其进

行一定的修正^[4]。根据 API 581，燃气持续性泄漏后发生安全排放、喷射火焰、闪火、蒸气云爆炸的概率分别为：0.8、0.1、0.06、0.04。

5.燃气事故破坏面积的计算

破坏面积的确定需要制定相应的破坏标准。表 1 列出了根据资料统计的财产损失和人员伤亡标准。据表 1 和公式 (3)~(6)，可计算每一种破坏模式所带来的破坏或伤亡面积^[5]（包括财产的全部或部分损失面积，人员的死亡、重伤、轻伤面积）。

表 1 财产损失和人员伤亡标准表

损失标准	财产损失		人员伤亡		
	全部	部分	死亡	重伤	轻伤
热强度 (kJ/m ²)	375	250	375	250	125
热通量 (kw/m ²)	37.5	25	—	25	12.5
超压 (MPa)	0.2	0.02	0.1	0.05	0.03

注：一般情况下人员可以及时远离喷射火焰，不会造成死亡。

燃气事故造成的总的损失由下式表示：

$$C_{comb} = \sum P_i A_j D_k \quad i, j, k \in N \tag{7}$$

式中： C_{comb} 表示总的损失； P_i 表示各种破坏模式出现的概率； A_j 表示此种破坏带来的破坏面积； D_k 表示该破坏面积内的人员或财产的密度。

在确定燃气泄漏量进而计算各种损伤爆炸模式的作用面积的同时，还需要对管道沿线的人员和财产分布情况进行统计，才能进行人员损伤和财产损失的计算。如果在不要求十分精确的情况下，可通过代入管道沿线平均人口密度分布的方法进行估算。对于财产损失，可使用财产密度代替人口密度，并引用相应的财产损失标准进行计算。

二、实例计算

列举了一个假设实例计算对各步骤进行说明。

1.基本参数和假设

某高压天然气管道的参数为：内压 2.6 MPa；大气压力 1.0 MPa；管道内径 529 mm。计算中作如下假设：管道开裂导致天然气泄漏，裂口为长方形，长为管径的 60%，宽为 2 mm；管道内压在泄漏时保持不变；周围风速 4 m/s，大气稳定条件为中性；天然气—空气预混气的 TNT 收率为 10%，即有 10% 的预混气参与了蒸气云爆炸。

2.气云体积和形状

采用高斯模式计算天然气从管道中的泄漏，并使用 Matlab 软件对燃气泄漏后的扩散模式进行模

拟。计算可得 x 方向扩散距离 37.3 m, y 方向扩散距离 2.62 m, z 方向扩散距离 1.83 m, 气云体积 187.2 m^3 。气云形状大致为半椭球体, 如图 2 所示。

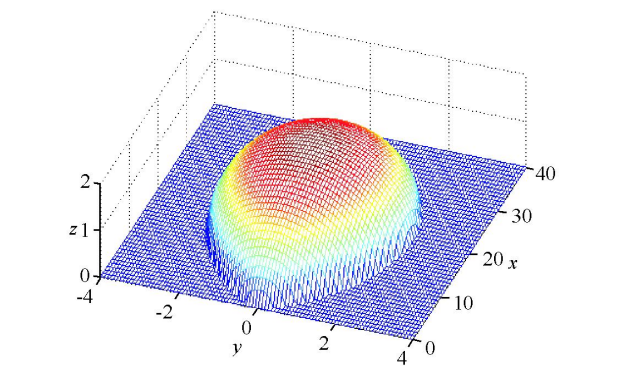


图 2 Matlab 软件模拟的燃气—空气预混气形状示意图

3.破坏面积

表 2 列出了此次泄漏导致的破坏面积。

表 2 财产损失和人员伤亡面积表

类型	财产损失		人员伤亡		
	全部	部分	死亡	重伤	轻伤
破坏面积(m^2)	21.1	32.0	15.2	19.5	38.3

4.损失估算

假设事故现场周围财产密度为 $0.1\text{ 万元}/\text{m}^2$; 人员密度为 $1\text{ 人}/10\text{ m}^2$; 财产的部分损失为损失总价值的 30%; 人员死亡赔偿标准为 10 万元; 重伤赔偿标准为 8 万元; 轻伤赔偿标准为 3 万元。经计算可得, 该次事故造成的直接经济损失约为 45 万元。

三、燃气扩散的主要影响因素

为了对燃气管道的失效后果进行准确计算, 需要对计算过程中使用的参数进行准确取值。而由计算实例可见, 在燃气泄漏、扩散及爆炸、爆燃过程中的许多参数都具有很大的不确定性, 给事故发生前的后果预测带来了很大难度^[6]。就燃气扩散模式而言, 燃气在扩散过程中会受到风速、风向等空气稳定性条件甚至地面特征等因素的影响, 会造成模型的不准确性和计算的误差。

解决这些问题的办法要通过大量精确的实验才能完成。然而通过使用 Matlab 软件可以对燃气的扩散过程进行模拟, 通过对模拟过程的观察, 可以简便地得到燃气扩散受多种条件影响的规律。

图 3、4 简要说明了燃气扩散浓度与风速大小、

燃气泄漏流量 3 者之间的关系。由图 3 可见, 在风速固定不变的情况下, 随着气体泄漏流量 Q 的增加, 燃气扩散的浓度 C 也是逐渐增加的, 而且基本呈正比关系; 随着风速 u 的不断增大, C 随着 Q 的增加而增加的幅度变得不明显, Q 对 C 的影响作用逐渐减弱。

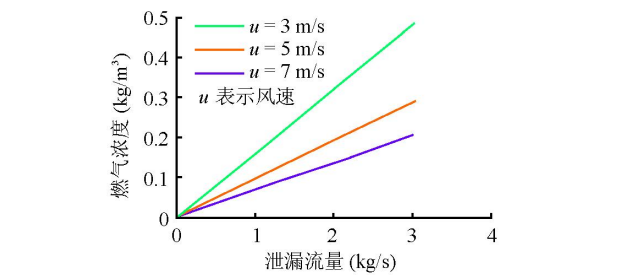


图 3 不同风速条件下燃气浓度与泄漏流量的关系图

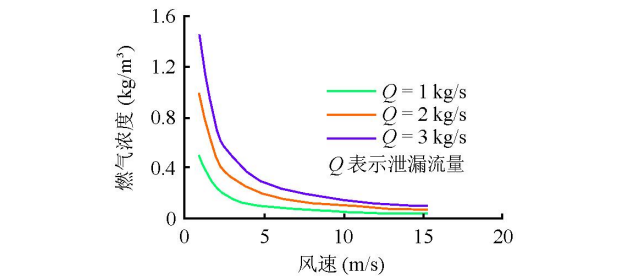


图 4 不同泄漏流量下燃气浓度与风速的关系图

而由图 4 可见, 在 Q 固定不变的情况下, 随着 u 的增加, C 逐渐减小。在 $u < 5\text{ m/s}$ 的时候, Q 对 C 的影响作用比较强; 而当 $u > 5\text{ m/s}$, Q 对 C 的影响变得不再明显; 在 $u < 5\text{ m/s}$ 的时候, 随着 Q 的增加, C 随 u 的增加而减小的趋势就越明显, 即风速对浓度的影响起主要作用。

参 考 文 献

[1] 蔡凤英,等.化工安全工程[M].北京:科学出版社,2003.
[2] 难波桂芳.化工厂安全工程[M].李崇理,等译.北京:化学工业出版社,1986.
[3] 张国顺,等译.爆炸危险性及其评估[M].北京:群众出版社,1979.
[4] American Petroleum Institute. Risk based resource document[S]. API PR581. 2000.
[5] 汪元辉.安全系统工程[M].天津:天津大学出版社,1999.
[6] 沈斐敏,伍良.燃气泄漏风险评价中的不确定性问题的探讨[J].中国安全科学学报,2002,12(1):30.

(修改回稿日期 2005-10-19 编辑 居维清)