

LNG 储罐泄漏危险性数值计算

季 洁^{1,2} 韩雪峰^{1,2}

1. 南京工业大学城市建设与安全工程学院, 江苏 南京 210009;

2. 江苏省危险化学品本质安全与控制技术重点实验室, 江苏 南京 210009

摘 要:为解决 LNG 储罐泄漏扩散模拟分析过程中存在计算和分析过程过于复杂的问题,通过选取适当的气体扩散模型,利用 Matlab 编写程序,对甲烷气体的扩散进行快速模拟计算,形成气体扩散浓度分布图,预测甲烷蒸汽在向下风向扩散的过程中形成爆炸危险区域,并模拟分析风速、地表粗糙度、泄漏速率等因素对 LNG 泄漏气体扩散影响。研究表明,当风速方向和泄漏源泄漏方向一致时,甲烷蒸汽扩散距离和危险区域面积随风速增大呈减小趋势;甲烷蒸汽在下风向扩散距离及危险区域面积随着地表粗糙度的增大而减小;甲烷蒸汽扩散距离和危险区域面积随泄漏速率的增大而增大。

关键词:扩散;模型;模拟;Matlab;浓度

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2015.03.012

0 前言

液化天然气(LNG)是由天然气(主要成分是甲烷)被冷却到 -162.2°C 液化形成,在储存、运输和使用过程中均有可能发生泄漏。LNG 储罐泄漏后体积将急剧膨胀,迅速蒸发成蒸汽,与空气混合形成易燃易爆、不断扩散的蒸汽云团^[1],对泄漏点周围的环境、人员和财产安全造成严重威胁。如何快速预测该类气体的扩散趋势和浓度分布,是编制事故应急救援预案及进行事故应急救援亟需解决的问题。在计算危险性气体扩散过程中,存在以下问题^[2]:计算过程复杂;危险性后果未能具体量化;分析时间长;分析结果无法直观形象地表达;安全状况反映较慢。随着计算机技术的快速发展,利用计算机结合危险性气体扩散模型开发各种风险分析软件已成为风险分析的一种主要方法,利用计算机进行风险分析具有以下优点:计算速度快;风险分析周期短;风险分析工作实现量化;事故的起因、扩大和结果实现可视化。计算机仿真技术在风险分析方面逐渐得到运用,常见的建模和仿真软件有 Matlab、Rose、Visio 等^[3]。本文选取 Matlab 对 LNG 储罐泄漏后甲烷气体的扩散过程和结果进行模拟和数值分析,实现 LNG 泄漏后果的快速计算及

可视化。

1 气体扩散模型选取

LNG 小孔连续性泄漏后会迅速闪蒸形成蒸汽,LNG 还没有达到地面之前已经闪蒸完毕,闪蒸后的蒸汽与周围空气混合,蒸汽与周围空气密度相当,属于自由扩散。目前,比较常见且应用较为广泛的有害气体泄漏与扩散模型有唯相模型、箱模型、相似模型、浅层模型、Gaussian 模型、CFD 模型等^[4-8]。不同模型各有优缺点,各种模型的适用范围、模拟准确性、计算精度、计算量以及工程适用性比较见表 1。

假设 LNG 是小孔径连续性泄漏,泄漏后的 LNG 闪蒸为蒸汽,由于形成的蒸汽密度比空气密度小,因此 Gaussian 模型较为合适。Gaussian 模型又称中等密度云连续扩散模型,其数学表达式^[9]为:

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

式中: $c(x, y, z)$ 为连续泄漏时 (x, y, z) 给定点的气体浓度, mg/m^3 ; Q 为连续泄漏的泄漏速率, kg/s ; μ 为平均风速, m/s ; x 为下风向距离, m ; y 为横风向距离, m ; z 为离地

表 1 各种气体扩散模型比较

模型	适用范围	模拟准确性	计算精度	计算量	工程适用性	选用模型
唯相模型	重气瞬时或连续释放的地面源	低	一般	较小	不合适	—
箱模型	重气瞬时或连续扩散	一般	较好	稍大	好	—
相似模型	重气瞬时或连续扩散	较好	较好	稍大	一般	—
浅层模型	轻质气体瞬时或连续点源扩散	较好	较好	稍大	一般	—
Gaussian 模型	重气瞬时或连续扩散	较好	较好	较小	一般	✓
CFD 模型	重气瞬时或连续扩散	好	好	大	一般	—

面的距离, m ; σ_y, σ_z 分别为 y, z 方向扩散参数, 与下风向距离 x 、地面粗糙度 Z_0 等有关^[10]。

从式(1)可见, σ_y, σ_z 等都是关于 x 的方程, 如果已知某位置的 x, y, z 则可通过计算求出泄漏速率为 Q 条件下的气体浓度, 但是给出任意位置气体浓度, 其解释是无穷的, 所有解构成了高斯浓度等值曲线。

2 Matlab 气体扩散数值模拟分析

2.1 程序编写

结合上述模型, 利用 Matlab 将 Gaussian 模型编写为程序模块, 其主要实现部分如下:

```
Q = input('输入源强 (mg/s): Q = ');
μ = input('输入计算风速 (m/s): μ = ');
d = input('输入计算精度 (m): d = ');
Z0 = input('输入地面粗糙度 (m): Z0 = ');
[x, y] = meshgrid(0 : d : 1000, -100 : d : 100); % 定义解空间和计算精度;
by0 = 0.08 * x. * (1 + 0.0001 * x). ^(-1/2); % 计算 y 轴向的基本扩散参数;
bz0 = 0.06 * x. * (1 + 0.0015). ^(-1/2); % 计算 z 轴向的基本扩散参数;
by = by0. * (1 + 0.38 * Z0); % 对 y 轴向基本扩散参数按地面粗糙长度进行修正;
fz = (2.53 - 0.13 * log(x)). * (0.55 + 0.042 * log(x)). ^(-1). * Z0. ^ (0.35 - 0.03 * log(x)); % 按地面粗糙长度计算 z 轴向扩散参数修正系数;
bz = bz0. * fz; % 对 z 轴向基本扩散参数按地面粗糙长度进行修正;
tempy1 = -y. * y./ by./ by./ 2;
tempy2 = 2.718 282. ^ (tempy1);
c = Q/ pi/ u * ((by. * bz). ^(-1)). * tempy2;
Cs = input('请输入所有求解浓度 (mg/m³): '); % 输入参数以 "[ " 和 "]" 结束;
contour(x, y, c, Cs); % x, y 变量分别为 x, y 轴坐标, 绘制扩散浓度分布图;
colorbar;
```

该程序中的源强、风速、地面粗糙度参数和计算步长等可根据实际情况分析设置。

2.2 算例分析

LNG 储罐泄漏后形成的蒸汽在向下风向扩散的过程中形成爆炸危险区域, LNG 的主要成分是甲烷, 其爆炸极限为 5%~15%, 取 LNG 的平均分子量为 17.3, 换算成质量浓度约为 30~94 mg/m³。美国消防协会制订的 NFPA 59A 及美国国会制订的 49 CFR 作为 LNG 储存场所设计标准^[11], 标准中均规定 LNG 储存企业必须预测 LNG 泄漏后的最大影响范围(地面浓度大于 1/2 LFL 的范围), 并采取相应措施尽量减小影响范围, 降低事故发生概率, 因此甲烷浓度在 2.5%~15% 之间的区域属于爆炸危险区域。

本文以南京市郊区为研究区域, 区内起伏较大, 地面高差为 101 m。该地区季风变化比较明显, 冬季多北风、西风和西北风, 夏季多南风 and 东南风。全年主导风向为北风, 频率为 16%; 次主导风向为南风, 频率为 9.6%; 年平均风速 5 m/s, 最大风速 20 m/s。

现假设一 LNG 储罐泄漏, 泄漏速率 Q 为 0.5 kg/s, 取年平均风速为 5 m/s, 泄漏时间为 30 s, 大气稳定度为 D 类^[12]、地面粗糙度参数 Z_0 为 1 m, 计算步长为 1 m (计算精度要求到 m), 则所求气体浓度 C 分别取为 94、30、15 mg/m³ 的位置解构成一系列高斯曲线(图 1)。在事先完成编程和调试的情况下, 从输入初始值到得出计算结果只需 10 s, 为危险化学品泄漏危险性的预测提供了一种更快捷的计算方法。

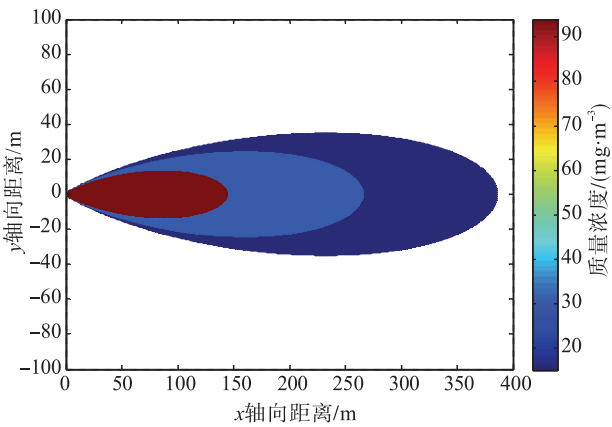


图 1 甲烷气体下风向扩散浓度分布

数值模拟分析结果表明,储罐泄漏点下风向蒸汽 UFL、LFL、1/2 LFL 的最大扩散距离分别为 140、270、380 m,泄漏点水平侧方向蒸汽的最大扩散距离约为 35 m,将扩散范围近似椭圆形分布,爆炸危险区域面积近似为 20 881 m²。图 1 可直观显示 LNG 泄漏后甲烷蒸汽浓度分布区域,对采取事故应急救援措施,确定人员疏散的范围及疏散方向有较好的指导作用。

3 甲烷蒸汽扩散影响因素分析

由式(1)可知,甲烷蒸汽的扩散只与风速、地面粗糙度和泄漏速率有关,故本文对储罐内 LNG 质量和泄漏点不作假设。研究以上因素对甲烷蒸汽扩散的影响,有利于了解甲烷蒸汽的扩散规律,能为控制甲烷蒸汽扩散、降低事故危害提供借鉴。

3.1 风速对气体扩散影响

选取 LNG 泄漏速率为 0.5 kg/s,地面粗糙度为 1 m,分别选取不同风速条件下,运用 Matlab 对甲烷蒸汽扩散后果进行模拟,当选取风速为 1、3、5、7、9、11、13、15 m/s 时进行数值模拟。气体扩散距离和危险区域面积见表 2,甲烷蒸汽扩散距离随风速的变化见图 2。

表 2 不同风速下甲烷蒸汽最大扩散距离和危险区域面积

风速/(m·s ⁻¹)	扩散距离/m	危险区域面积/m ²
1	920	115 552
3	510	34 430
5	380	20 881
7	320	15 072
9	280	10 990
11	255	9 208
13	230	7 583
15	210	6 264

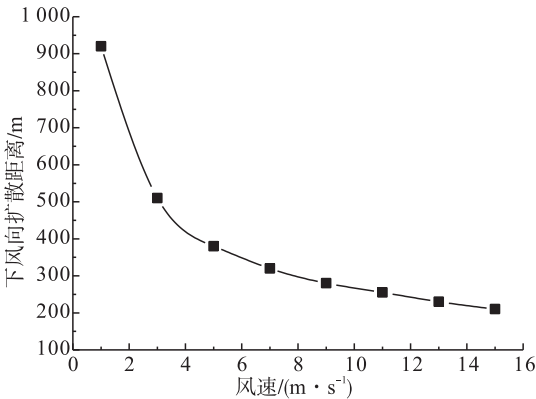


图 2 不同风速对甲烷蒸汽扩散影响

由图 2 可见,随着风速的增加,甲烷蒸汽扩散的最远距离逐渐减小,表 2 显示危险区域面积也逐渐减小。其主要原因是风一方面将泄漏甲烷蒸汽向下风向整体输送,使得甲烷蒸汽总是在泄漏源的下风向扩散分布;另

一方面风产生的湍流对泄漏气体冲淡稀释,风速越大,单位时间内甲烷蒸汽混合的清洁空气量就越多,加快了甲烷蒸汽的扩散,使气体的着地浓度降低,因此扩散距离和危险区域面积较小。

3.2 地表粗糙度对气体扩散影响

选取甲烷蒸汽泄漏速率为 0.5 kg/s,风速为 5 m/s,地面粗糙度分别为 0.5、1、2、3 m 时进行数值模拟。气体扩散距离和危险区域面积见表 3,甲烷蒸汽扩散距离随地面粗糙度的变化见图 3。

表 3 不同地面粗糙度下甲烷蒸汽最大扩散距离和危险区域面积

地面粗糙度/m	扩散距离/m	危险区域面积/m ²
0.5	440	24 178
1	380	20 881
2	320	17 584
3	280	16 705

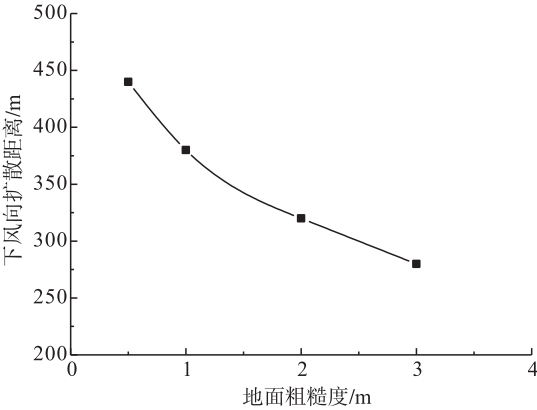


图 3 不同地面粗糙度对甲烷蒸汽扩散影响

由图 3 可见,随着地面粗糙度的增加,甲烷蒸汽下风向扩散距离减小,表 3 也显示甲烷蒸汽形成的爆炸危险区域面积也减小。因此,地面粗糙度越大,蒸汽扩散越不容易,为有效减小蒸汽扩散形成的爆炸危险区域面积,可采用种植乔灌木等方式增加地表粗糙度。

3.3 泄漏速率对气体扩散影响

选取风速为 5 m/s,地面粗糙度为 1 m,分别选取不同泄漏速率对甲烷蒸汽扩散后果进行模拟,当选取泄漏速率为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 kg/s 时进行数值模拟,气体扩散距离和危险区域面积见表 4,甲烷蒸汽扩散距离随泄漏速率的变化见图 4。

由图 4 可见,随着 LNG 泄漏速率的增加,横风向和下风向甲烷蒸汽扩散距离逐渐增加,表 4 同时显示甲烷蒸汽爆炸危险区域面积逐渐增大。其主要是因为泄漏速率增加,空气的稀释能力有限,就会随着风向下风向扩散,扩散距离增大。因此,在 LNG 发生泄漏后,应及时切断泄漏源,或者对泄漏源进行封堵,减少 LNG 的泄漏量。

表 4 不同泄漏速率下甲烷蒸汽最大扩散距离和危险区域面积

泄漏速率/(kg·s ⁻¹)	扩散距离/m	危险区域面积/m ²
0.1	162	3 815
0.2	230	7 944
0.3	290	12 293
0.4	340	16 548
0.5	380	20 881
0.6	425	25 356
0.7	460	30 332

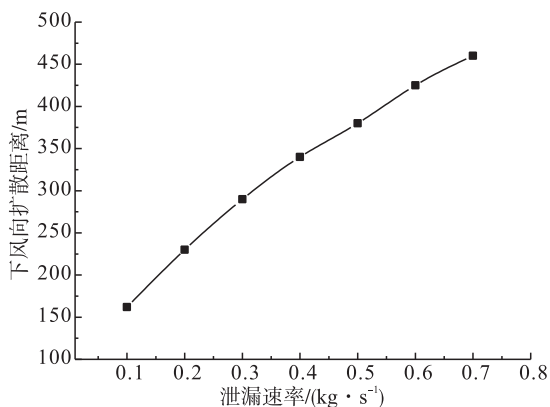


图 4 不同泄漏速率对甲烷蒸汽扩散影响

4 结论

本文通过比较不同气体扩散模型的优缺点和适用范围,选取了适用于甲烷蒸汽扩散的 Gaussian 模型;运用 Matlab 进行程序编写,对甲烷蒸汽扩散进行数值模拟;分析了 LNG 泄漏后,甲烷蒸汽沿地表扩散的等浓度分布规律及对甲烷蒸汽扩散的各种影响因素;确定了给定条件下的甲烷蒸汽扩散距离和危险区域面积,并实现了 LNG 泄漏后蒸汽扩散浓度分布的可视化及危险区域的划分。得出以下结论:

1)运用 Matlab 结合精确的气体扩散模型,能够快速对危险性气体扩散浓度分布进行准确计算。

2)风一方面对甲烷蒸汽向下风向整体输送,使得甲烷蒸汽总是在泄漏源的下风向扩散分布;另一方面随着风速的增加,横风向和下风向蒸汽扩散的距离逐渐减小,同时泄漏危险区域面积减小。

3)甲烷蒸汽在下风向扩散最远距离随着地表粗糙度的增大而减小。

4)甲烷蒸汽在下风向扩散距离和扩散面积随着泄漏速率的增加而增大。

参考文献:

[1] 刘 勇. 液化天然气的危险性与安全防护[J]. 天然气工业,2004,24(7):105-107.
Liu Yong. Dangers and Safeguards of LNG[J]. Natural Gas

Industry,2004,24(7):105-107.

[2] Ding Xinwei,Wang Shulan. Review on Combustible and Toxic Gas Leakage Diffusion Research[J]. Chemical Industry and Engineering,1999,2(16):118-122.
[3] Li Yong. Introduction of Computational Fluid Mechanics General Software[J]. Journal of Hydrodynamics,200,16(2):254-258.
[4] 潘旭海,蒋军成,华 敏. 环境条件对 LNG 泄漏扩散影响的模拟研究[J]. 天然气工业,2009,29(1):117-119.
Pan Xuhai,Jiang Juncheng,Hua Min. Simulation Research on the Influence of Environmental Condition on LNG Leakage and Dispersion[J]. Natural Gas Industry,2009,29(1):117-119.
[5] 黄沿波,梁 栋. 重气扩散模型分类方法[J]. 安全与环境工程,2008,15(4):72-75.
Huang Yanbo,Liang Dong. Classification Method of Heavy Gas Diffusion Model[J]. Safety and Environmental Engineering,2008,15(4):72-75.
[6] 彭世尼,段 萍. LNG 泄露后果的预测模型[J]. 重庆大学学报,2006,29(1):93-96.
Peng Shini,Duan Ping. Models for Predicting Consequences of LNG Releases [J]. Journal of Chongqing University,2006,29(1):93-96.
[7] 何 莎,袁宗明. 重气效应研究进展[J]. 中国测试技术,2008,34(4):113-114.
He Sha,Yuan Zongming. Research Progress in Heavy Gas Effects [J]. China Measurement & Testing Technology,2008,34(4):113-114.
[8] 黄 琴,蒋军成. 重气扩散研究综述[J]. 安全与环境工程,2007,14(4):38-39.
Huang Qin,Jiang Juncheng. A General Review of Studies on Heavy Gas Dispersion [J]. Safety and Environmental Engineering,2007,14(4):38-39.
[9] 何 宁,吴宗志. 危险性气体扩散数值计算高斯模型的改进[J]. 基础科学与工程,2010,18(4):571-577.
He Ning,Wu Zongzhi. Simulation of an Improved Gaussian Model for Hazardous Gas Diffusion[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2010,18(4):571-577.
[10] 艾唐伟,徐小贤. Matlab 在危险气体扩散模拟分析中的应用[J]. 工业安全与环保,2009,35(3):24-26.
Ai Tangwei,Xu Xiaoxian. Application of Matlab in Dangerous Air Proliferation Simulate and Analysis[J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2009,35(3):24-26.
[11] NFPA 59A. Standard for the Production,Storage, and Handling of Liquefied Natural Gas (LNG) [S].
[12] Ermak D L. User's Manual for SLAB: An Atmospheric Dispersion Model for Denser-Than-Air-Release [R]. America: Lawrence Livermore National Laboratory,1990:3-33.