

Simulation of Liquid Chlorine Leakage Accident in Chemical Enterprises

Yidan Ji, Hui Liu*, Weiyi Xia, Yuanyuan Dang, Luping Cheng

College of Quality & Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou Zhejiang
Email: liuhui2003@126.com

Received: Aug. 13th, 2018; accepted: Aug. 27th, 2018; published: Sep. 3rd, 2018

Abstract

In order to present the leakage and diffusion law of liquid chlorine in chemical storage tanks, and provide technical reference for emergency management of leakage accidents, the leakage, diffusion and propagation of chlorine gas under different conditions of liquid chlorine storage tank rupture were studied based on numerical simulation. The simulation results show that the leakage size, wind speed, leakage speed and surrounding vegetation have a significant impact on the diffusion of chlorine; when wind is moving at a speed of 2.5 m/s, the maximum diffusion distance of chlorine gas in the 1800 s to hurt the human can reach nearly 180 m, in contrast with the value, it has been reduced by about 40 m with surrounding vegetation. When the wind speed is greater than 2.5 m/s, the wind flow taken on a role to dilute the chlorine concentration.

Keywords

Chlorine Leak, Numerical Simulation, Safety Distance, Emergency Management

化工企业液氯泄漏事故后果模拟分析

季一丹, 刘 辉*, 夏威夷, 党媛媛, 程露萍

中国计量大学质量与安全工程学院, 浙江 杭州
Email: liuhui2003@126.com

收稿日期: 2018年8月13日; 录用日期: 2018年8月27日; 发布日期: 2018年9月3日

摘 要

为了呈现化工企业储罐液氯泄漏扩散规律, 以期为泄漏事故应急管理提供技术参考, 利用数值模拟的方

*通讯作者。

法,研究了液氯储罐破裂时不同条件下氯气的泄漏、扩散以及蔓延规律。模拟结果显示,泄漏口大小、风速、泄漏速度以及周边植被对于氯气的扩散有较为明显影响;2.5 m/s风速时,1800 s内氯气对人体造成伤害的最大扩散距离可达近180 m,有植被情况下可缩小约40 m;风速大于2.5 m/s时,风流起到稀释氯气浓度作用。

关键词

氯气泄漏,模拟,危险间距,应急管理

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

化工企业多以化工园区分布,我国化工园区起步于上世纪90年代,2000年以后呈快速发展势头。化工园区聚集众多化工企业,为各企业生产原材料的获得提供了方便,但与此同时也加大了发生事故的可能性和严重程度。如2004年4月,重庆某化工厂发生的氯气泄漏事故,造成9人死亡失踪,3人受伤,将近15万人被紧急疏散;2005年3月,京沪高速淮安段由于车祸导致大面积液氯泄漏,造成附近村民重大伤亡,中毒死亡人数将近30人,450多人中毒住院治疗,1800多人留院治疗,数万名村民被转移,造成家畜和家禽近9000多头死亡,20,000余亩农作物失收,多数树木鱼塘、当地村民的食用粮食和家用电器被污染,经济损失高达2000多万。2013年12月,陕西省榆林市某LNG加气站,在设备调试过程中发生意外,导致氯气泄漏,造成4名员工死亡[1]。由于化学危险物质相对集中,一旦化工园区发生火灾爆炸等重大事故[2],单个企业的事故很可能最终发展蔓延成多个企业甚至整个园区内的重特大事故。在我国发生的化学事故中,涉及到氯气的事故占多数。随着氯产品产业的高速发展,液氯逐渐被广泛使用。近年来,液氯罐车运输和储存使用中发生泄漏造成严重事故也时有发生。由于氯气泄漏事故具有扩散迅速、防护困难、毒性极强、危害范围广、持续时间长以及社会影响大等特点[2],一旦泄漏危害极大,因此,针对化工企业液氯泄漏后果,本文基于Fluent软件进行模拟分析,可以为化工企业液氯泄漏事故的预防和应急管理提供技术参考。

2. 计算模型

2.1. 模型选择

液氯泄漏属于连续的泄漏过程,研究选用烟羽模型。烟羽模型[3]的浓度分布的计算公式:

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

式中: Q_m ——泄漏源的泄漏速度, kg/m^3 ; x, y, z ——预测点坐标, m ; H ——有效源高, m , 等于泄漏源高度和抬升高度之和; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ——分别为 x, y, z 方向的扩散参数。

2.2. 假设条件

对氯气的整个泄漏扩散过程作以下假设:

- 1) 在整个泄漏过程中泄漏口径与氯气泄漏的速度不随时间的变化而变化;
- 2) 泄漏的气体视为理想气体;
- 3) 在整个泄漏扩散的过程中, 不会发生任何化学反应;
- 4) 风向不随时间、地点、高度的变化而变化, 都成水平方向;
- 5) 在整个泄漏扩散过程中与外界无任何热量交换。

2.3. 泄漏量与泄露速率

液化气体作为压力气体, 它的泄漏方式与压力气体泄漏的方式一致, 通常是以射流的形式发生泄漏, 因此泄漏的速度和其运动的状态有着密切的联系。通过相关资料显示氯气泄漏的质量泄漏速率可以按照以下计算[4]:

$$Q = C_d A \rho \sqrt{\frac{2(p - p_0)}{\rho} + 2gh} \quad (2)$$

式中: Q ——泄漏源的泄漏速度, kg/m^3 ; C_d ——泄漏系数, 此值常用 0.6~0.64; A ——泄漏口的面积(m^2); P ——容器内介质压力 Pa; P_0 ——环境压力 Pa; g ——重力加速度; h ——裂口之上的液位高度, m; ρ ——氯气密度, kg/m^3 。

3. 事故后果模拟与分析

3.1. 企业液氯储罐区简介

储罐区占地 2500 平方米, 长 50 m, 宽 50 m。储罐区的四个储罐均为卧式储罐, 高 3.5 m, 罐体直径为 2.55 m; 罐体长度为 10.43 m。储罐区与周围的厂房距离 20 m, 与周边的道路边沿距离 15 m。罐体之间的防火间距为 3 m。储罐区顶棚高 5 m。储罐区布置如图 1 所示。

3.2. 模型建立与网格划分

为了便于计算, 将储罐区近似视为空旷场所。网格的划分会直接影响到计算结果的准确性, 网格划分越均匀, 计算结果也会更加接近实际, 同时也会利于计算结果的收敛, 因此使用将网格的最优化结果来划分网格。泄漏口单独划分, 其余地方采用非均匀三角形网格。具体情况见图 2。

3.3. 模拟结果分析

3.3.1. 在不同风速的情况下氯气的扩散情况

假设该化工企业的 4#罐发生液氯泄漏。在 4#罐一端高 2.5 米处产生一个 1.0 cm 的圆孔, 运用控制变

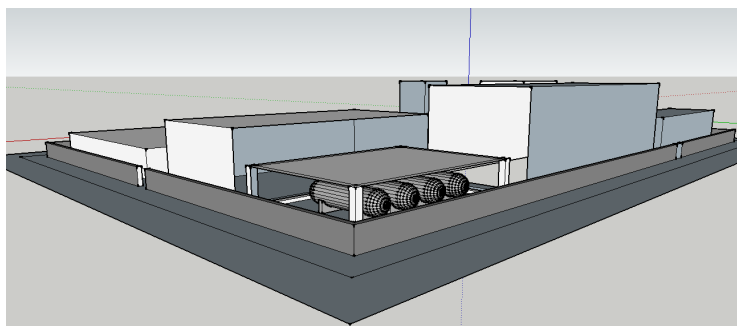


Figure 1. Three-dimensional layout of liquid chlorine storage tank
图 1. 储罐区方位三维布置图

量法来, 设置泄漏口直径为 1.0 cm, 泄漏速度 0.1 kg/s。改变风速分别为 1.0 m/s、2.5 m/s 和 5.0 m/s, 模拟结果如图 3~5 所示。从图 3~5 可以看到, 氯气泄漏过程中, 氯气受风速影响较大, 由于氯气密度大于空气, 氯气在近地面比较集中, 同时在泄漏口附近浓度也会随着风速的增大而逐渐减少, 表明风速对于氯气的扩散作用明显。同时, 当风速从 0 到 2.5 m/s 时, 风速增大, 氯气扩散加快, 周边浓度随风速变大而增大; 当风速大于 2.5 m/s 时, 风速增大, 远离泄漏口的氯气浓度反而变小, 说明此刻风流起到稀释氯气浓度作用。

3.3.2. 不同泄漏速度下氯气的扩散情况

忽略风速的影响, 改变泄漏口的速度分别为 1 kg/s、0.5 kg/s、0.1 kg/s, 泄漏口直径取 0.5 cm。模拟计算得出不同泄漏速度下扩散浓度分布图如图 6~8 所示。

泄漏云图显示, 泄漏口的氯气泄漏速度越大, 单位时间内流出的氯气也就越多, 扩散也越快, 储罐区域周边氯气浓度也随之增大; 反之, 扩散范围越小。但由于顶棚的阻隔作用, 以及氯气自身的重力, 顶棚以下的储罐区氯气浓度依然呈现较高状态, 而且随着泄漏速度下降, 扩散减慢, 氯气更容易在顶棚以下的储罐区汇集。

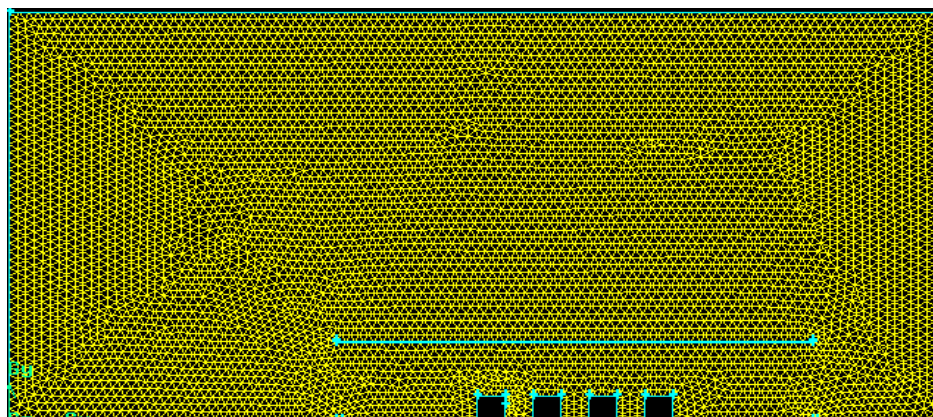


Figure 2. Meshing situation

图 2. 网格划分情况

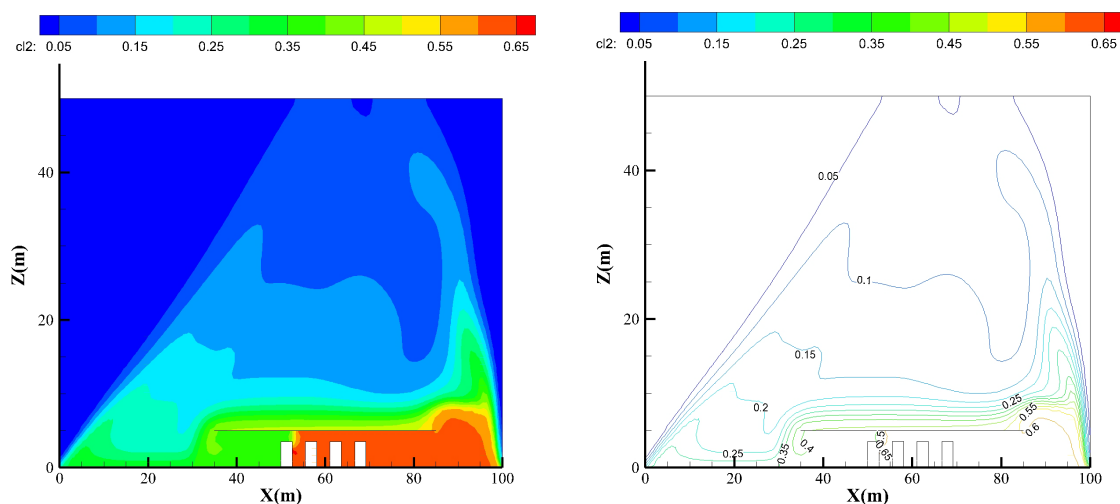


Figure 3. Diffusion cloud map and iso-concentration line of chlorine gas ($v_{wind} = 1.0$ m/s)

图 3. 风速 1.0 m/s 时氯气的扩散云图及等浓度线图

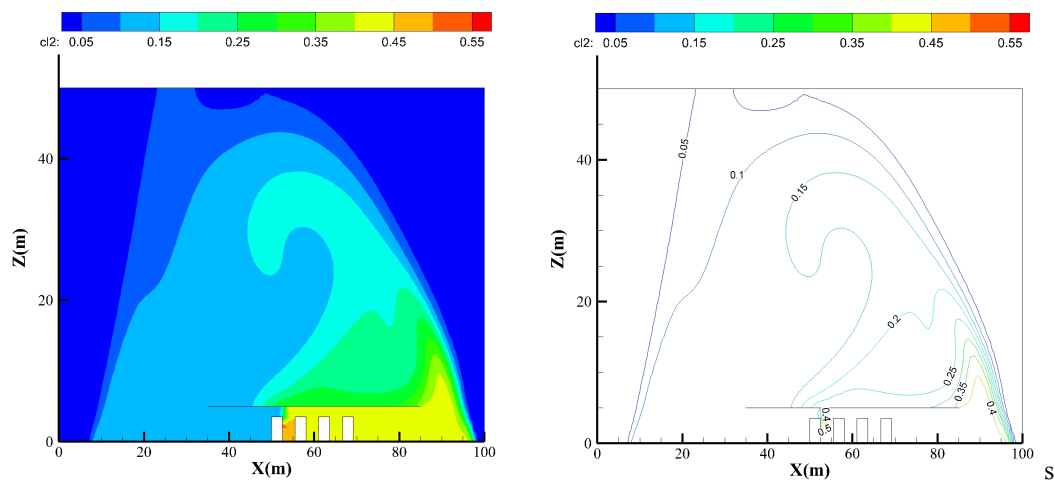


Figure 4. Diffusion cloud map and iso-concentration line of chlorine gas ($v_{wind} = 2.5\text{ m/s}$)

图 4. 风速 2.5 m/s 时氯气的扩散云图及等浓度线图

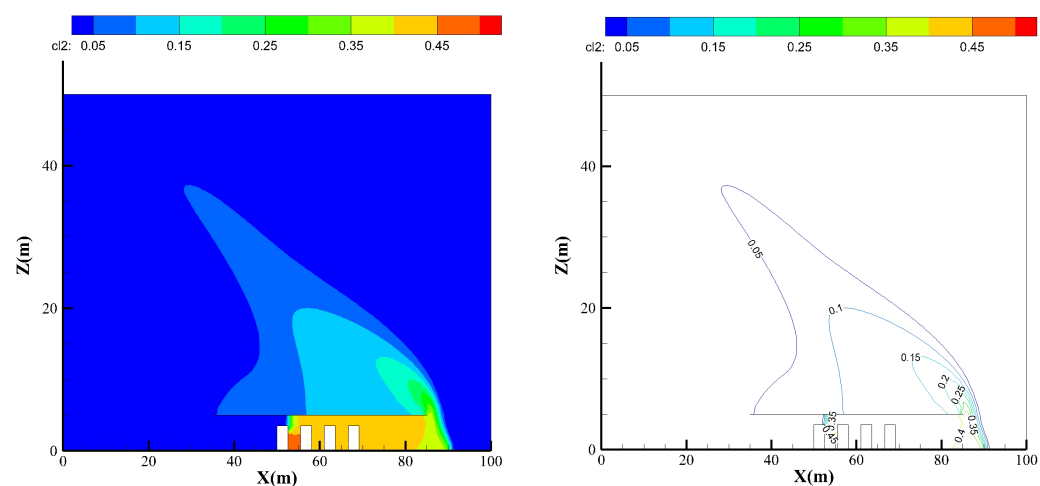


Figure 5. Diffusion cloud map and iso-concentration line of chlorine gas ($v_{wind} = 5.0\text{ m/s}$)

图 5. 风速 5.0 m/s 时氯气的扩散云图及等浓度线图

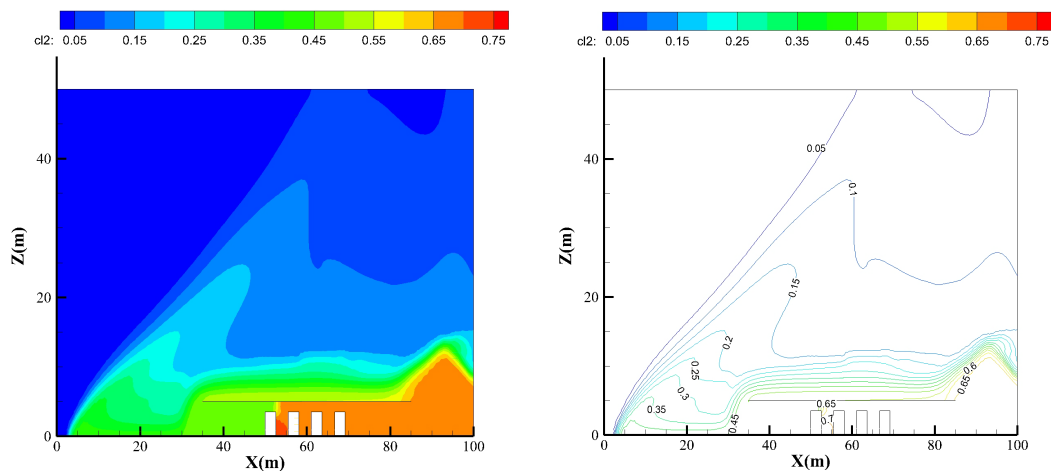


Figure 6. Diffusion cloud map and iso-concentration line of chlorine gas ($Q_m = 1.0\text{ kg/s}$)

图 6. 泄漏速度 1 kg/s 时氯气扩散云图及等浓度线图

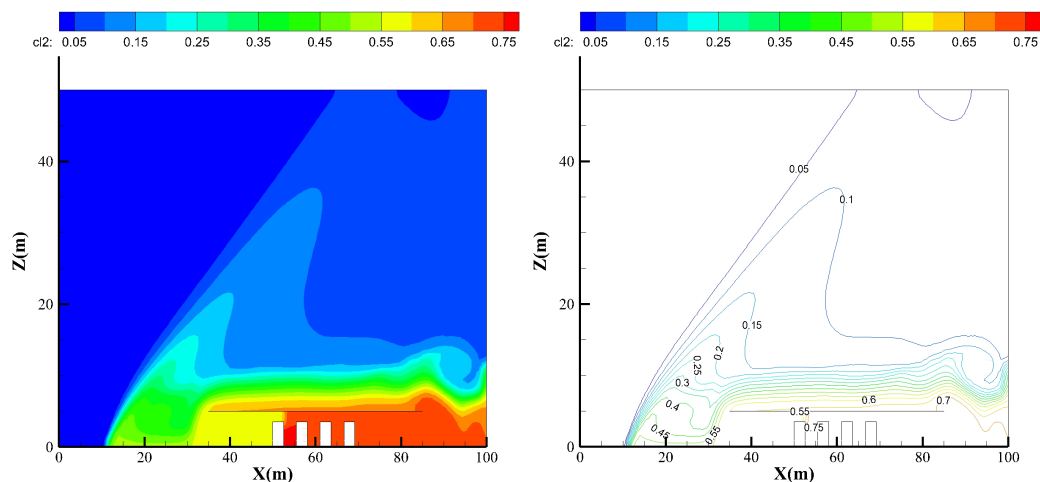


Figure 7. Diffusion cloud map and iso-concentration line of chlorine gas ($Q_m = 0.5 \text{ kg/s}$)

图 7. 泄漏速度 0.5 kg/s 时氯气扩散云图及等浓度线图

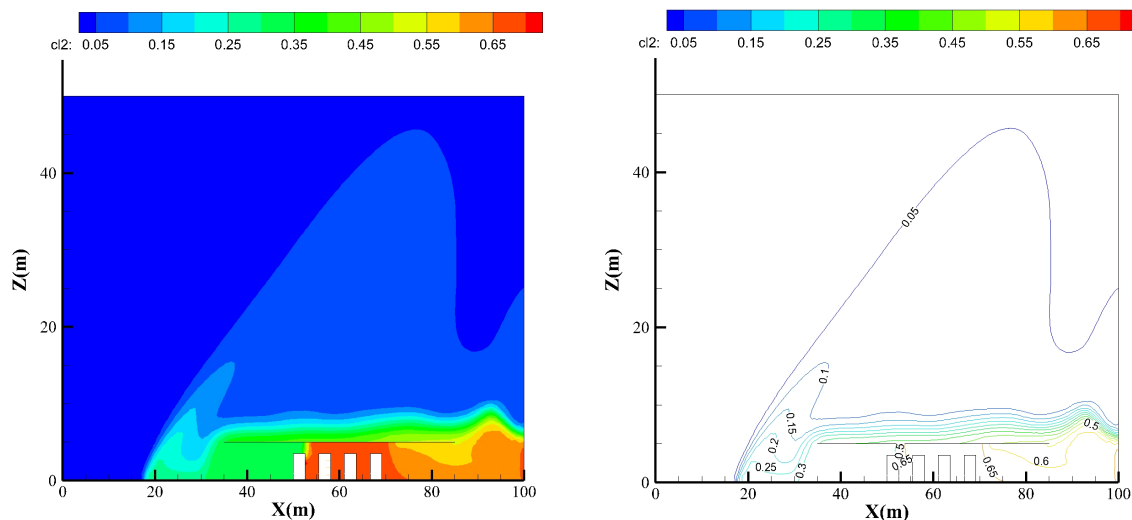


Figure 8. Diffusion cloud map and iso-concentration line of chlorine gas ($Q_m = 0.1 \text{ kg/s}$)

图 8. 泄漏速度 0.1 kg/s 时氯气扩散云图及等浓度线图

3.3.3. 泄漏口的大小对氯气扩散的影响

设置泄漏口直径分别为 0.5 cm 、 1.0 cm 、 2.0 cm 的圆孔，泄漏口高度为 2.5 m ，自然风速为 6.0 m/s ，模拟获取氯气扩散云图如图 9~11 所示。

由图 9~11 得知，泄漏口大小对泄漏口附近的氯气浓度影响较大。泄漏口越大，泄漏口附近氯气浓度越大；反之则越小。同时，从云图分布及等浓度线观察，泄漏口大小对氯气在周边扩散范围影响一般。

3.3.4. 植被对氯气扩散的影响

前文分析可以看出障碍物对于氯气的泄漏有一定的影响，为进一步分析周边障碍物的影响，通过在储罐区周围增加一些绿色植被，模拟绿色植被对氯气泄漏的扩散影响规律。具体结果如图 12 所示。

从上述图对比可以看到泄漏区域的几处植被对于氯气扩散有较大影响，氯气泄漏基本限制在植被圈中；同时，在泄漏氯气沿着风向移动扩散中，其扩散速度也明显减小。植被的存在，对于氯气的扩散范围和速度有一定的限制。由此可以根据液氯储罐周围的环境适当的加些障碍物或者一些绿化，对于限制

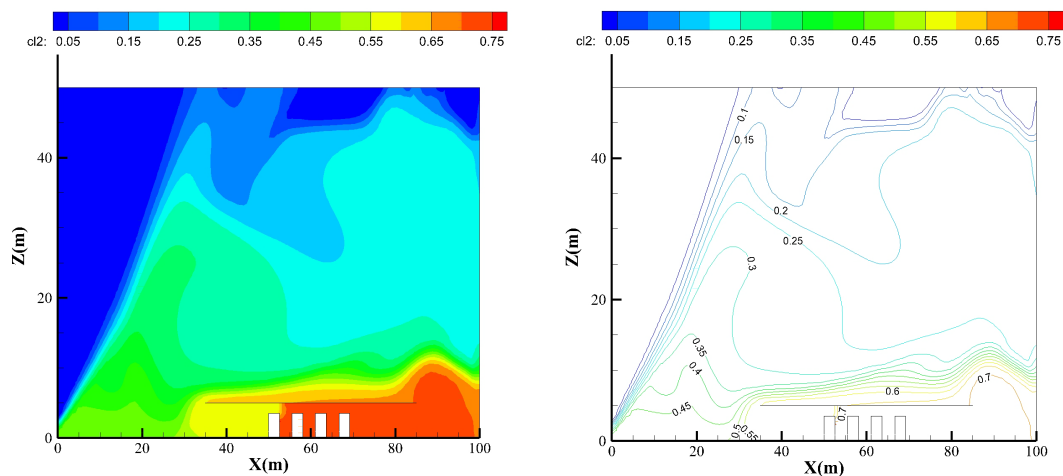


Figure 9. Diffusion cloud map and iso-concentration line of chlorine gas ($d = 0.5$ cm)

图 9. 泄漏口直径为 0.5 cm 时氯气扩散云图及等浓度线图

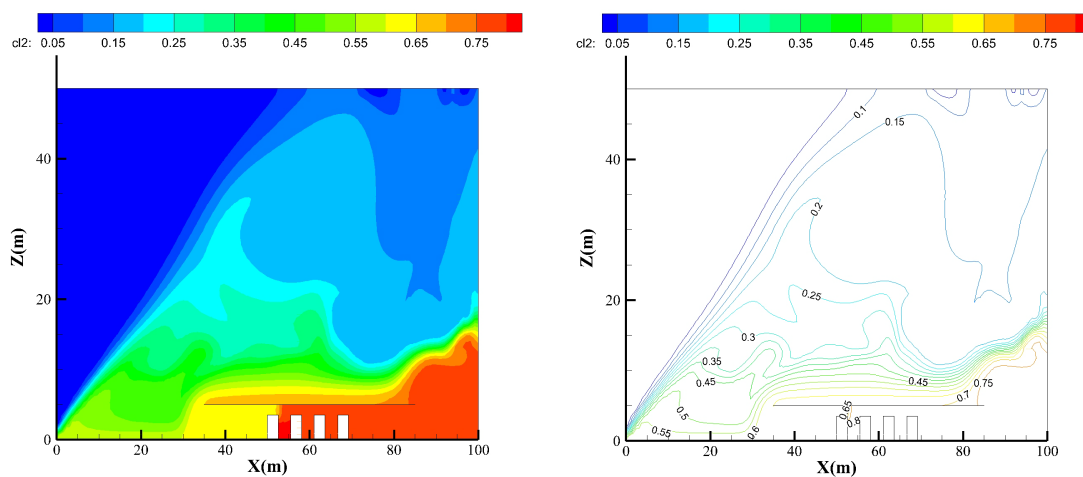


Figure 10. Diffusion cloud map and iso-concentration line of chlorine gas ($d = 1.0$ cm)

图 10. 泄漏口直径为 1.0 cm 时氯气扩散云图及等浓度线图

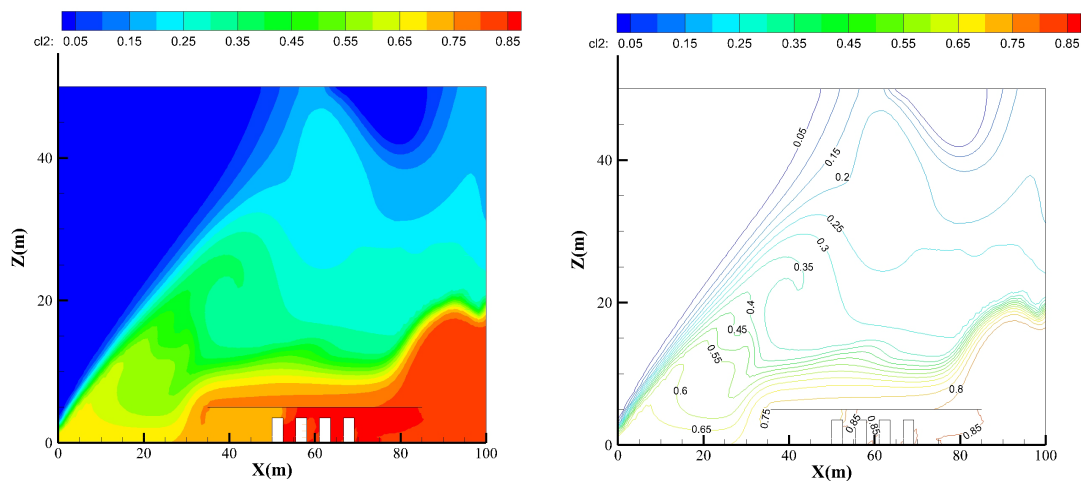


Figure 11. Diffusion cloud map and iso-concentration line of chlorine gas ($d = 2.0$ cm)

图 11. 泄漏口直径为 2.0 cm 时氯气扩散云图及等浓度线图

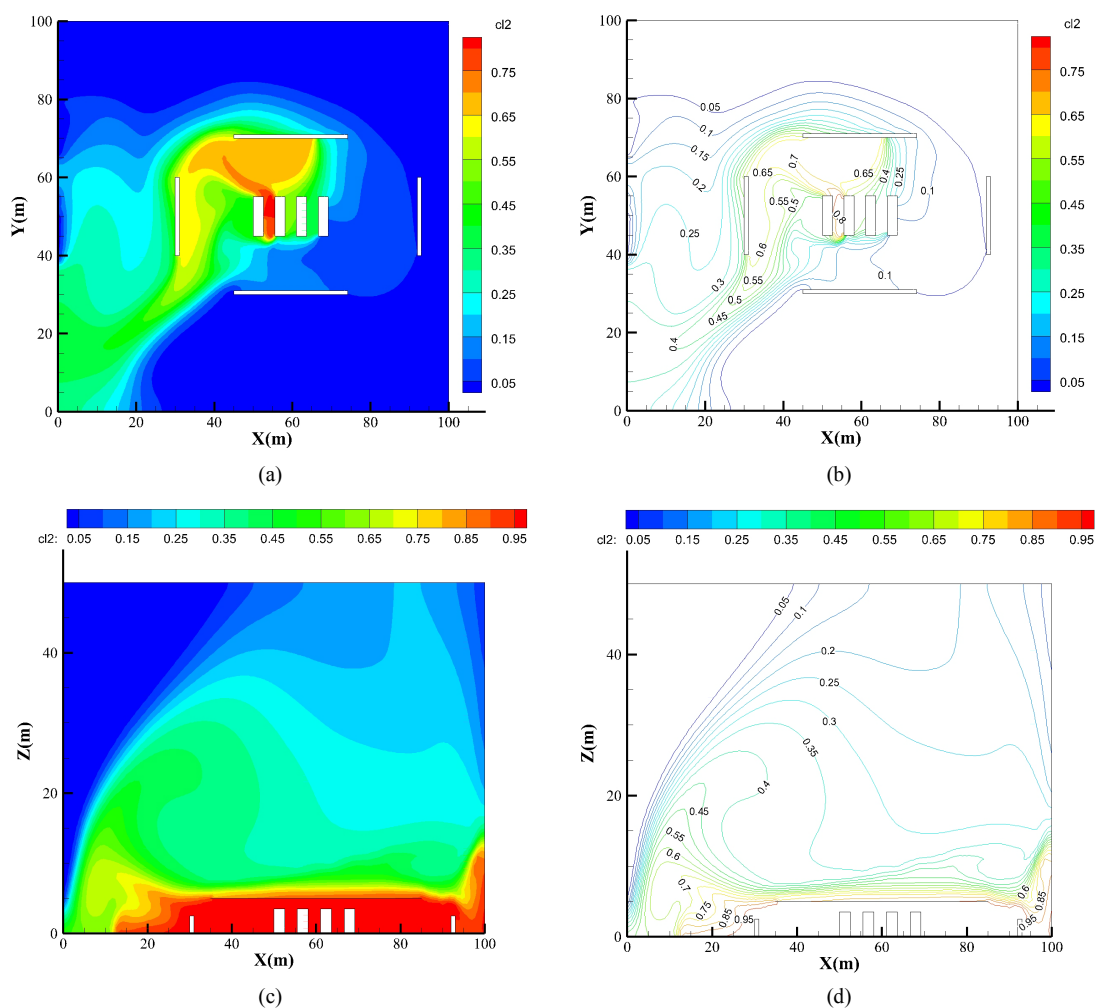


Figure 12. The influence of vegetation on leakage of chlorine
图 12. 植被对氯气泄漏扩散的影响

液氯扩散范围和速度，赢得应急救援时间有一定作用。

从上述图对比可以看到泄漏区域的几处植被对于氯气扩散有较大影响，氯气泄漏基本限制在植被圈中；同时，在泄漏氯气沿着风向移动扩散中，其扩散速度也明显减小。植被的存在，对于氯气的扩散范围和速度有一定的限制。由此可以根据液氯储罐周围的环境适当的加些障碍物或者一些绿化，对于限制液氯扩散范围和速度，赢得应急救援时间有一定作用。

4. 危险区域界定

氯气具有剧毒性，少量氯气便可对人体造成伤害。氯气泄漏浓度对人体的危害，主要通过人体呼吸道、皮肤、消化道发生中毒机理，刺激眼膜，使人流泪、失明、呼吸道损害、窒息、甚至肺水肿、心力逐渐衰竭死亡等症状。不同浓度的氯气对人体伤害如表 1 所示[5]。

由表可知，1800 s (30 min)时长，当氯气浓度在 $120\sim 180\text{ mg/m}^3$ 之间时，对人体已然构成伤害。因此危险区域便以 120 mg/m^3 作为分界线来拟定。当空气中氯气浓度为 120 mg/m^3 的地区为危险区域。在 Fluent 中模拟结果显示的为氯气在空气中的体积分数，因此要对应到模拟图，需要做适当的转换。通过换算， 120 mg/m^3 对应 0.0927% 的体积分数，因此可以划定体积分数大于 0.0927% 的区域为非安全区，需要设置

Table 1. Chlorine hazard level**表 1.** 氯气危害程度分级

浓度(mg/m ³)	危害程度	浓度(mg/m ³)	危害程度
0.06~1.5	无不适反应	90	引起剧咳
1.5	稍微闻到气味	120~180	接触 30~60 min, 引起中毒
3~9	有明显气味和刺激感	300	可引起致命性损伤
18~40	刺激咽喉	3000	吸入少许可危及生命

Table 2. Dangerous zone of chlorine gas diffusion**表 2.** 氯气扩散影响后果危险区域

泄漏速度(kg/s)	风速(m/s)	最大危险间距(m)	最大危险间距(植被)(m)
0.1	1.0	40.6	29.6
	2.5	68.8	45.8
	5.0	35.1	29.6
0.5	1.0	65.2	42.1
	2.5	103.9	89.6
	5.0	63.6	51.2
1	1.0	87.2	65.9
	2.5	178.4	136.3
	5.0	93.2	88.4

警戒线。对于不同泄漏速度和风速下的最大危险间距可以通过模拟计算获取，具体结果如表 2 所示。由表 2 可知，泄露速度和风速大小，对于液氯扩散的危险区域形成影响较大，而植被能够延缓氯气的扩散。

5. 结论

1) 基于 fluent 软件，运用高斯烟羽模型模拟计算了液氯的泄漏扩散作用，并对模拟结果进行可视化分析，考虑了风速、泄露速率、泄漏口直径大小以及植被对氯气泄漏的影响。

2) 通过危险区域计算，当风速为 2.5 m/s，泄漏速度 1.0 kg/s，1800 s 内氯气对人体造成伤害的最大扩散距离可达近 180 m，有植被情况下可缩小约 40 m。

3) 风速大于 2.5 m/s 时，风流起到稀释氯气浓度作用。

参考文献

- [1] 于立见. 一种瞬间泄漏重气扩散模型的探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(1): 12-16.
- [2] 侯兵. 液氯泄漏事故后果模拟分析与应急管理[J]. 商品与质量, 2017(28): 191.
- [3] 潘旭海, 蒋军成. 危险性物质泄漏事故扩散过程模拟分析[J]. 天然气工业, 2001, 21(5): 87-91.
- [4] 李鹏. 化工企业氯气泄漏事故疏散安全距离数值模拟研究[J]. 武警学院学报, 2013, 29(8): 11-13.
- [5] 沈艳涛, 于建国. 有毒有害气体泄漏的 CFD 数值模拟(I)模型建立与校验[J]. 化工学报, 2007, 58(3): 745-749.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-8844，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjcet@hanspub.org