



移动扫码阅读

黄浩祎, 谢建林. ALOHA 软件在氯乙烯泄漏事故中的应用与分析[J]. 能源环境保护, 2021, 35(2): 86-93.
HUANG Haoyi, XIE Jianlin. The application and analysis of ALOHA software in a vinyl chloride leakage accident [J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(2): 86-93.

ALOHA 软件在氯乙烯泄漏事故中的应用与分析

黄浩祎, 谢建林

(1. 太原科技大学 环境与安全学院, 山西 太原 030024)

摘要:以某化工厂氯乙烯泄漏事故为背景, 通过 ALOHA 软件对事故影响范围进行分析。对有毒气体扩散、蒸气云爆炸以及沸腾液体扩展蒸气云爆炸的事故影响范围进行模拟, 利用 Google Earth 在地图中拟合泄漏事故危害范围。结果表明: 有毒气体扩散事故中, 一级致毒区域、二级致毒区域和三级致毒区的范围分别为下风侧 1 000~2 500 m、483~1 000 m 和 483 m; 蒸气云爆炸事故热辐射影响第 1 警戒线和第 2 警戒线区域面积分别约为 231 m×200 m、561 m×280 m, 第 3 警戒线内氯乙烯浓度低且爆炸事故概率较小; 蒸气云爆炸冲击波红色警戒线、橙色警戒线和黄色警戒线内半径分别约为 214 m、298 m、621 m; 对于沸腾液体扩展蒸气云爆炸事故, 氯乙烯泄漏储罐周围 800 m 内的人员接触热辐射后有致命危险, 可能造成人员烧伤的事故范围为 1 100 m, 在 2 000 m 范围内人员接触热辐射 60 s 会产生疼痛感。

关键词:安全; 氯乙烯; ALOHA 软件; 事故模拟; 后果分析

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2021)02-0086-08

The application and analysis of ALOHA software in a vinyl chloride leakage accident

HUANG Haoyi, XIE Jianlin

(1. School of Environment and Safety, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Based on a vinyl chloride leakage accident in a chemical plant, the affected area was analyzed by ALOHA software. The affected areas of toxic gas diffusion, vapor cloud explosion and boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE) were simulated. Google Earth was used to fit the hazard area of the leakage accident in the map. The results show that for the toxic gas diffusion accident, the first, second and third-level toxic areas are 1 000~2 500 m, 483~1 000 m and 483 m of the downwind side, respectively. For the thermal radiation from vapor cloud explosion, the areas of the first and second warning line are 231 m × 200 m and 561 m × 280 m. The concentration of vinyl chloride within the third warning line is low and causes a small probability of explosion. The radii of red, orange and yellow warning lines of shock waves are about 214 m, 298 m and 621 m, respectively. For the BLEVE accident, people within 800 m of the vinyl chloride leaking tank has a fatal risk when exposed to thermal radiation. People within 1 100 m of the tank may be burned. People within 2 000 m of the tank will feel pain after exposed to thermal radiation for 60 s.

Key Words: Safety; Vinyl-chloride; ALOHA; Accident-simulation; Consequence analysis

0 引言

我国的化工行业发展迅猛,其中化工行业所涉及的原料产品中易燃易爆的有毒有害物质较多,在产品生产、储存及原材料运输过程中由于某些原因使得有毒有害物质泄漏,造成人员中毒伤亡,引发火灾爆炸等事故时有发生。利用软件模拟进行预测是一种有效且节省成本的方法,许多学者利用 ALOHA 软件对事故进行模拟分析,模拟结果对现场的安全疏散工作有指导作用^[1]。

ALOHA 软件最先应用于美国,由美国环保署(EPA)及美国海洋大气管理局(NOAA)联合共同开发,在模拟化学品泄漏事故的范围此软件发挥了优势^[2]。2000 年起国内学者开始引进 ALOHA 软件方法,梁虎利用 ALOHA 软件进行预测危险化学品在大气中的扩散形状和区域面积,并以图的形象表示出扩散的浓度、影响范围和其他信息^[3]。相艳景等在环氧乙烷储罐泄漏事故中使用 ALOHA 软件模拟,分析了 5 种危险事故如中毒、闪火及火灾爆炸等,得出 5 种事故定量的伤害范围^[4]。闫洁洁等运用 ALOHA 软件模拟结合公式计算的方法分别对液氯泄漏进行评估,结果表明 ALOHA 软件在预测危害区域和敏感点浓度方面精度较高^[5]。田水承、王春华、邵辉、焦姣、朱云峰等^[6-10]分别针对氯乙烯、液氯、苯、液氨及环氧乙

烷发生的泄漏事故使用 ALOHA 软件进行不同事故的数值模拟,并根据结果对危险区域进行划分,对厂区的布置规划和应急救援决策有着重要意义。N.S.Anjana 等^[11]使用 ALOHA 软件预测氨泄漏的有毒性气体影响距离,并结合 GIS 数据库制定了相应的救援方案。

本文以河北省某化工厂氯乙烯泄漏事故为背景,结合事故报告的信息对氯乙烯泄漏过程中所引起 3 种事故:有毒气体扩散、蒸气云爆炸热辐射与冲击波超压范围及沸腾液体扩展蒸气云爆炸(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions, BLEVE)范围进行分析。通过 Google Earth 将泄漏危害区域在地图中呈现出来,得到泄漏事故的伤害范围。针对泄漏事故影响范围提出风险控制措施及建议,以期通过预测事故的范围提高风险管控的能力。

1 氯乙烯的性质与泄漏事故类型

1.1 氯乙烯的性质

氯乙烯是可燃性气体,无色有特殊芳香气味,液化氯乙烯属于甲 A 液化烃类可燃物质,爆炸极限范围是 3.6%~33%^[12]。氯乙烯具有毒性,吸入该气体后会产生麻醉作用,浓度过高可致人立即死亡^[13]。氯乙烯的性质如下表 1 所示。

表 1 氯乙烯的性质

Table 1 Properties of vinyl chloride

中文名	英文名	化学式	熔点/℃
氯乙烯	Vinyl chloride	C ₂ H ₃ Cl	-159.8
分子量	常温蒸气压/mmHg	爆炸极限/%	沸点/℃
62.5	3 877.5	3.6~33.0	-13.4

1.2 氯乙烯储罐泄漏事故类型

氯乙烯储罐在发生泄漏后,泄漏物质与空气迅速结合,在未遇到火源的情况下,毒性气体扩散造成中毒事故;若混合气体在扩散途中遇到明火,会发生火灾爆炸事故^[14]。本文背景事故中未发生池火灾与喷射火事故,因此对于池火灾与喷射火事故本文不予考虑,文章仅对有毒气体扩散、蒸气云爆炸范围及沸腾液体扩展蒸气云爆炸(BLEVE)3 种事故范围进行分析。

2 数学模型介绍

通过对厂区内氯乙烯泄漏事故进行分析,主

要研究泄漏过程引发的气体扩散、蒸气云爆炸以及沸腾液体扩展蒸气云爆炸事故,所涉及的数学模型有流体力学的相关数学模型、重气扩散模型、气体爆炸模型以及沸腾液体扩展蒸气云爆炸模型,以下将详细介绍文章所涉及的数学模型。

2.1 气体扩散过程中的数学模型

本文中氯乙烯气体扩散遵循无化学反应的单项气体多组分扩散的规律,在扩散的过程中涉及的流体力学方程主要包括:连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程、及组分守恒方程^[15]。

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量守恒方程: } \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \rho_a g_i - \rho g_i + \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\text{能量守恒方程: } \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{u_i}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{c p_x - c p_a}{c p} \left[\left(\frac{u_i}{\sigma_c} \right) \frac{\partial w}{\partial x_j} \right] \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\text{组分质量守恒方程: } \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D_1 \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \omega) \quad (4)$$

式中: ρ 为气体密度, u_j 为 x, y, z 方向速度分量, P 为压力, u_i 为流体湍流粘度, g_i 为 x, y, z 方向重力加速度, T 为流体的温度, σ_T 为常数, 一般取 0.9~1.0, $c p$ 为混合物的定压比热, $c p_x$ 为泄漏物的定压比热, $c p_a$ 为大气环境定压比热, D_1 为湍流的扩散系数。

2.2 重气扩散模型

当氯乙烯储罐处于特定的压力和温度下发生

$$c(x, y, z, 0) = c_0 \exp \left\{ - \left[\left(\frac{|y| - b(x)}{S_y(x)} \right)^2 + \left(\frac{z}{S_z(x)} \right)^{1+\alpha} \right] \right\} \quad y > b \quad (5)$$

$$c(x, y, z, 0) = c_0 \exp \left[- \left(\frac{z}{S_z(x)} \right)^{1+\alpha} \right] \quad y = b \quad (6)$$

$$u_x = u_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad (7)$$

式中: c 为泄漏物质的质量浓度, c_0 为中心位置泄漏物的质量浓度 m , b 为水平范围宽度 m ; S_y 为大气水平浓度比率, S_z 为大气垂直浓度比率, α 为风速廓线常数, z_0 为风速廓线高度 m , u_0 为 z_0 高度上的实际风速 m/s , u_x 为 x 轴正方向的实际风速 m/s 。

2.3 气体爆炸模型

典型的蒸气云爆炸伤害模型包括有 TNT 当量模型、TNO 模型、CAM 模型等^[16]。本文选取 TNT 当量模型, 模型计算式如下所示:

$$W_{TNT} = \frac{a w_f Q_f}{Q_{TNT}} \quad (8)$$

式中: W_{TNT} 为蒸气云的 TNT 当量, w_f 为蒸气云燃料的总质量, a 为蒸气云爆炸效率因子, Q_f 为蒸气云燃烧热, Q_{TNT} 为 TNT 的爆炸热, 取值为 4.5 MJ/kg。

气体爆炸后的冲击波是以被引燃处为中心向四周扩散, 气体爆炸冲击波超压值计算式为:

$$L = R / \sqrt[3]{W_{TNT}} \quad (9)$$

$$P_i = \frac{3.9}{L^{1.85}} + \frac{0.5}{L} \quad (10)$$

式中: L 为 R 处的爆炸特征长度; R 为到火球中心的距离, P_i 为 R 处的爆炸冲击波的超压值。

其中蒸气云爆炸产生的热辐射, 计算模型如

泄漏时, 具有气液二相流特征, 在泄漏口附近会发生闪蒸现象, 液化的氯乙烯快速蒸发使得周围空气的温度下降, 与空气形成混合物, 混合气体的密度大于空气, 氯乙烯的泄漏扩散会受到重力的作用, 表现为重气扩散。因此选用重气扩散模型进行分析, 其表达式如下所示:

下所示:

$$\frac{Q}{(bG) M^{1/3} \theta^{2/3}} = \frac{4r^2 / R^2}{161.7 + D^2 / R^2} \quad (11)$$

式中: Q 为热剂量, bG 为常量, 取值 2.04×10^4 , M 为火球消耗的燃料质量, θ 为火球的温度, r 为火球半径, R 为到火球中心的距离。

2.4 沸腾液体扩展蒸气云爆炸

沸腾液体扩展蒸气云爆炸事故发生的原因是装有化学品的储罐发生泄漏, 导致液体泄漏, 内部的液体快速喷射至空中, 并且一部分液体瞬间变为气体, 膨胀为由可燃液体蒸汽和未气化的液滴组成的蒸气云团, 此时点燃会形成火球^[17]。本文采用沸腾液体扩展蒸气云爆炸火球静态计算模型:

$$\text{火球直径: } D_c = 5.8 \sqrt[3]{m_f} \quad (12)$$

$$\text{火球持续时间: } t_c \begin{cases} 0.45 \sqrt[3]{m_f}, m_f < 30\,000 \text{ kg} \\ 2.6 \sqrt[6]{m_f}, m_f \geq 30\,000 \text{ kg} \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{火球热辐射: } q = \frac{2.2 \tau_a R H_c m_f^{0.67}}{4\pi L^2} \quad (14)$$

式中: m_f 为燃料质量, H_c 为单位质量燃烧热, R 为燃烧热辐射系数, τ_a 为大气传输率, 干燥晴朗的天气 $\tau_a = 1$ 。

3 ALOHA 软件介绍及参数设置

3.1 ALOHA 模拟软件简介

ALOHA 软件是一款主要用于危险化学品泄漏事故后果风险分析研究的软件,软件的数据库包含近千种化学品信息,根据泄漏物质、泄漏位

置、大气情况等信息,软件通过对话框的形式,对输入的场景信息进行提示,可以模拟化学品泄漏后的有毒气体扩散、爆炸、闪火、喷射火等危险事故,在模拟结束后以图表和文本的形式输出相应的计算结果,软件主要操作步骤如下图所示。

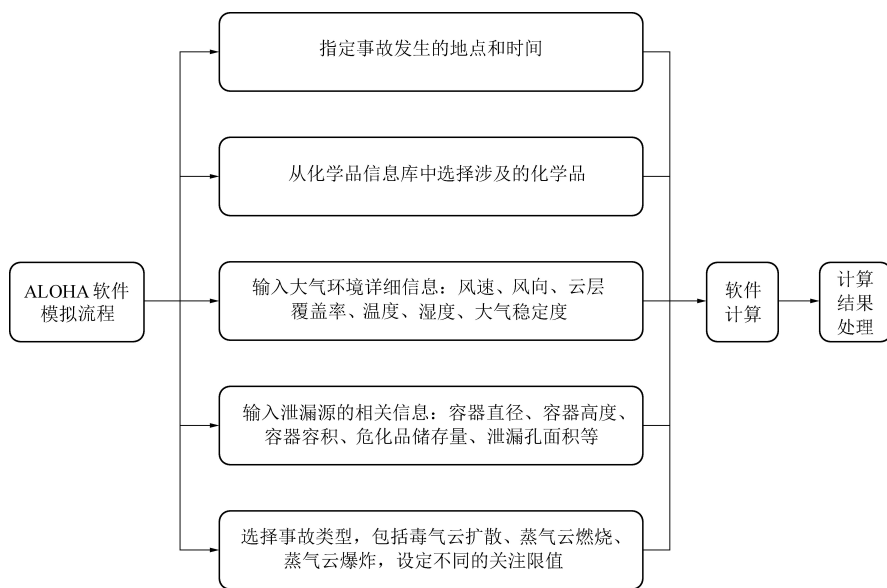


图 1 ALOHA 软件模拟流程

Fig.1 ALOHA software simulation flow

3.2 ALOHA 模拟参数的设置

根据当地气象部门发布的数据,室外气温为 -8°C ,西北风,风速 4 m/s ,相对湿度 18% 。发生泄漏的氯乙烯储罐为双层钟罩型结构,储罐底部水槽内径、中节内径及上段钟罩内径分别为 24.5 m 、 23.5 m 、 22.5 m ,容积为 $5\ 000\text{ m}^3$,储罐结构尺寸示意图如图 2 所示。

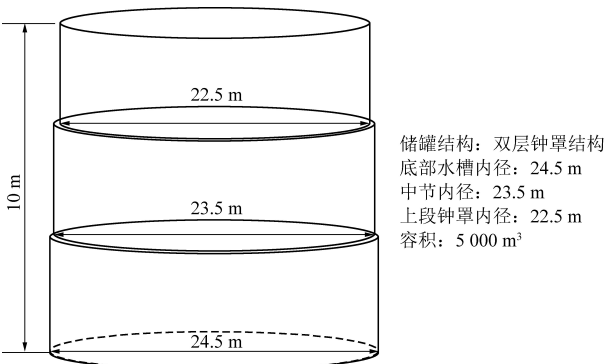


图 2 氯乙烯储罐尺寸示意图

Fig.2 Dimension diagram of the vinyl chloride storage tank

在模拟前,需要判断泄漏类型是属于连续泄漏还是瞬时泄漏,连续泄漏形成的气云称为云羽,瞬时泄漏形成的气云称为云团。根据事故的资料可判断本文中的泄漏类型属于连续泄漏,在软件

模拟时选择连续泄漏类型作为模拟的前提。

假设泄漏发生位置为储罐距离地面 8.5 m 处,泄漏孔径为 15 cm ,充装系数为 80% 。储罐内氯乙烯常温储存,储存压力为 3 kPa 。储罐在软件内置的化学品数据库中选择氯乙烯。由于氯乙烯在实际的储存中以液化后的形态储存在储罐中,当储罐发生泄漏后,氯乙烯会以液态和气态的混合状态存在,本文仅研究氯乙烯泄漏后气化的气体扩散过程。

针对氯乙烯泄漏过程的有毒气体扩散影响的范围、蒸气云爆炸热辐射作用和冲击波超压范围及沸腾液体扩展蒸气云爆炸事故热辐射范围运用 ALOHA 软件进行模拟,事故模拟结果结合 Google Earth 进行定量分析,针对泄漏事故影响范围提出合理的警戒区域。

4 模拟结果分析

4.1 有毒气体扩散事故影响范围模拟

氯乙烯气体在泄漏后迅速与空气结合,在未遇到火源的情况下形成大面积的有毒气体区域,本文使用急性暴露指导浓度(Acute Exposure Guideline Level, AEGL)指标对氯乙烯储罐泄漏过

程产生的有毒气体影响范围进行划分。急性暴露指导浓度值分 3 个等级: AEGL-1 为轻度中毒区域, 该区域中人员会出现不适等某些无症状丧失感觉的现象, 但这种现象是暂时的, 撤离该区域后身体可恢复正常; AEGL-2 为中度毒性区域, 暴露于这一毒气环境的人员中会出现严重的对健康有害的影响, AEGL-3 是高毒性区域, 此区域的人员暴露于这一毒气环境会出现危及生命的影响或者死亡^[18]。泄漏孔径的尺寸为 15 cm, 对有毒气体扩散范围进行模拟分析如图 3(a) 所示, 将有毒气体扩散范围在 Google Earth 进行拟合, 结果如图 3(b) 所示。

氯乙烯储罐泄漏点下风侧 483 m 范围内为三

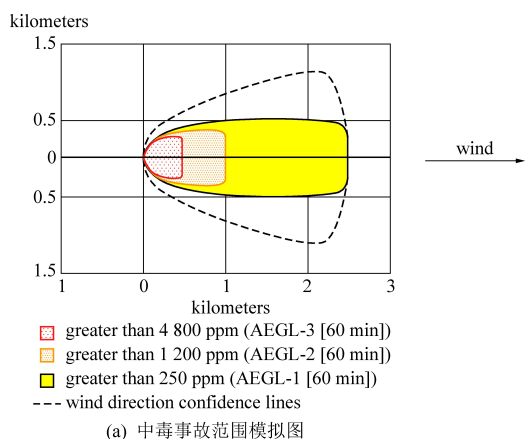


图 3 中毒事故影响范围

Fig.3 Area affected by the poisoning accident

通过 Google Earth 将模拟结果进行拟合, 如图 3(b) 所示, 严重伤害区域中泄漏储罐南侧 20 m 处有某省道, 车辆来往密集, 应当立即禁止其他车辆进入此区域, 避免携带火源造成不可逆转事故。轻度伤害区域范围大, 其中包括村庄、农田等区域, 此区域内可能造成人员身体不适的情况, 其中可能由于风速、风向及泄漏孔径的增大使伤害区域范围扩大, 因此该区域内应当加强防范措施。

本文以下风向 500 m 处人员密集场所为敏感点, 研究氯乙烯气体扩散对下风向 500 m 处浓度变化如下图 4 所示, 其中红色实线表示敏感点室内外的浓度, 黑色虚线表示敏感点室内的浓度变化。

由图 4 可见, 从事故发生后, 敏感点处的室外氯乙烯浓度在 3 min 到 10 min 内急剧上升, 浓度约为 $12\ 555.80\ \text{mg}/\text{m}^3$ ($4\ 500\ \text{ppm}$), 人员若暴露在此环境下会对身体造成严重损伤。该敏感点处室内的氯乙烯浓度随时间增加呈现缓慢上升的趋势, 约在 32 min 时达到 AEGL-2 等级对应的 $3\ 348.81\ \text{mg}/\text{m}^3$ ($1\ 200\ \text{ppm}$)。因此当氯乙烯泄漏时, 处于这一

级致毒区 (AEGL-3), 该区域氯乙烯浓度高达 $13\ 392.86\ \text{mg}/\text{m}^3$ ($4\ 800\ \text{ppm}$) 以上, 若无任何防护措施人员暴露于该区域, 会产生麻醉感、重度中毒甚至因呼吸衰竭而死亡, 故一旦发生泄漏事故, 此范围禁止人员停留, 防止人员发生中毒死亡事故。二级致毒区域 (AEGL-2) 的边界是下风侧 1 000 m, 该区域内氯乙烯浓度达到 $3\ 348.21\ \text{mg}/\text{m}^3$ ($1\ 200\ \text{ppm}$) 以上, 处于较危险水平, 若不及时撤离暴露在该区域的人员会产生呕吐、眩晕等中毒症状, 该区域内的人员需及时疏散撤离。一级致毒区域 (AEGL-1) 的影响范围广阔, 边界为下风侧 2 500 m, 应设置警戒线禁止无关人员进入。

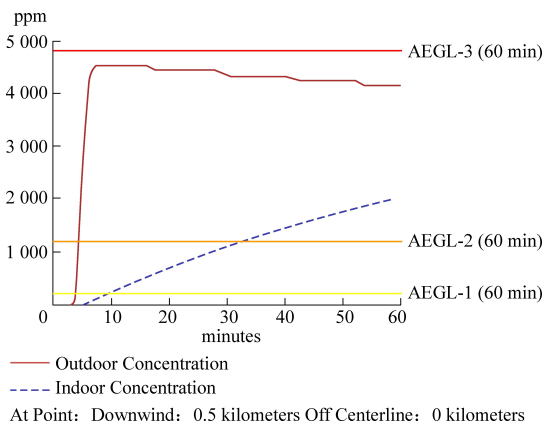


图 4 500 m 处敏感点浓度变化

Fig.4 Variation of sensitive point concentrations at 500 m

区域的人员应做好防护措施后进行撤离, 以减少有毒气体造成的伤害。

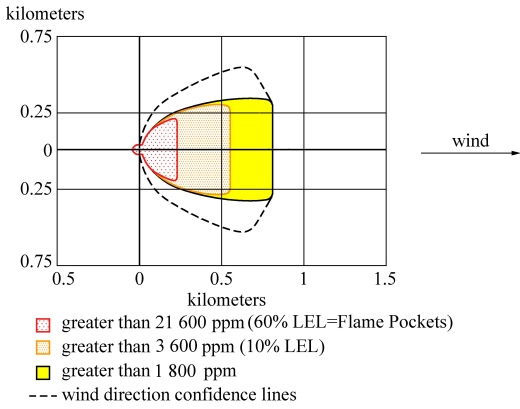
4.2 蒸气云爆炸热辐射与冲击波超压范围模拟

蒸气云爆炸事故伴随有冲击波超压和热辐射这两种破坏作用, 冲击波超压的危险系数大于热辐射。蒸气云爆炸事故的热辐射作用在 ALOHA 软件模拟结果如图 5(a) 所示, 将模拟数据在 Google Earth 进行拟合, 得到结果如图 5(b) 所示。

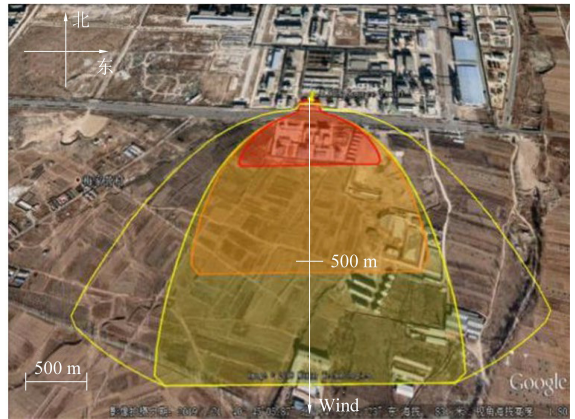
红色警戒线约为 231 m×200 m 的扇形区域, 气体浓度大于 60 267.86 mg/m³ (21 600 ppm), 遇到火源会发生爆炸事故。橙色警戒区域约为面积 561 m×280 m 的区域, 范围超过氯乙烯储罐所在的厂区, 气体浓度高于 10 044.64 mg/m³ (3 600 ppm) 属于爆炸事故潜在危险区。黄色警戒线范围较大, 最远距离可达 810 m, 与第一警戒线和第二警戒线区域的氯乙烯浓度相比发生爆炸事故的

可能性较小。图中最外层的虚线范围是由于一些不确定因素如风速、风向等会导致事故后果发生偏移, 此界限的区域可能会受到影响, 应做好相应的防护措施。

氯乙烯气体泄漏后与空气迅速发生混合, 达到满足爆炸的条件后, 遇到火源即发生爆炸事故, 冲击波超压区域会产生的强大气流, 具有强烈的破坏作用, 其破坏程度见表 2。



(a) 爆炸事故热辐射影响范围



(b) 爆炸事故热辐射范围Google Earth拟合结果

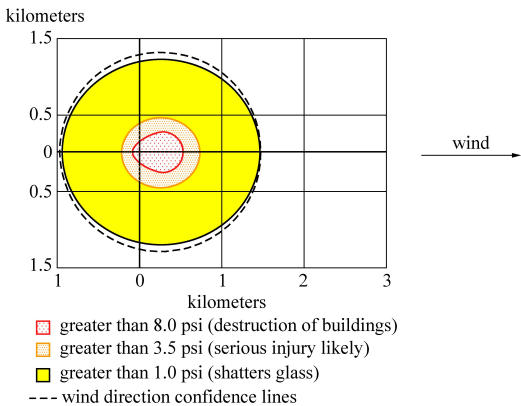
图 5 蒸气云爆炸事故热辐射影响范围

Fig.5 Area affected by thermal radiation of the vapor cloud explosion accident

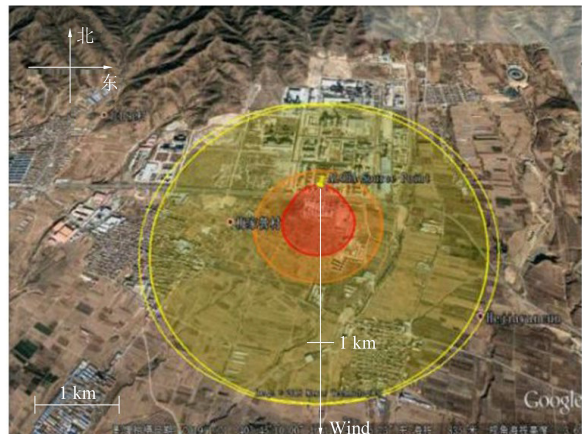
表 2 冲击波超压对人体伤害与建筑物破坏程度表

Table 2 The human injury and building damage caused by the overpressure of shock waves

超压 (kPa)	人体伤害与建筑物破坏程度
5~10	人体受到轻微影响, 建筑物玻璃门窗破碎, 人员可能受到挫伤
10~30	人体受到轻伤, 建筑物有明显的破坏
30~50	人体出现听觉损伤, 骨折等情况, 建筑物墙体受创
60~70	人体出现严重伤害, 可能导致死亡, 建筑物的钢骨架, 钢筋混凝土出现破坏
70~100	人员重伤或死亡, 建筑物砖墙倒塌
100~200	人体绝对致死, 建筑物防震钢筋混凝土破坏



(a) 冲击波影响范围



(b) 冲击波范围Google Earth拟合结果

图 6 蒸气云爆炸事故冲击波影响范围

Fig.6 Area affected by shock waves in the vapor cloud explosion accident

ALOHA 软件对气体爆炸冲击波超压范围进行模拟分析,如图 6(a)所示,模拟结果在 Google Earth 中拟合,结果如图 6(b)所示。

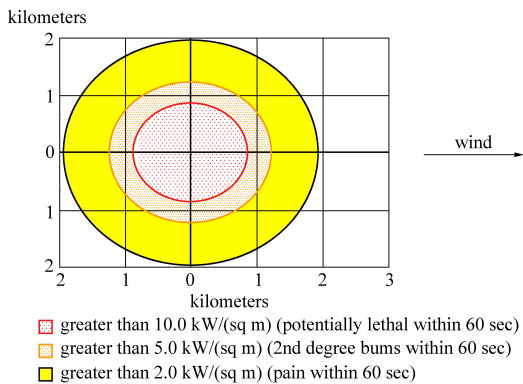
红色区域警戒线为 $r \approx 214$ m 的圆形区域,覆盖厂区及公路,超压冲击波超过 8.0 psi (1 psi = 6.895 kPa),会造成建筑物钢筋骨架结构和混凝土建筑物破坏,同时对人体产生骨折等身体危害。橙色警戒线是以 $r \approx 298$ m 为半径的圆形区域,冲击波压力大于等于 3.5 psi,此区域覆盖部分农田及村庄冲击波压力会使得部分建筑物破坏。黄色警戒线覆盖面积较大,呈现以 $r \approx 621$ m 为半径的圆形区域,冲击波压力达到 1.0 psi 以上,会引起建筑物玻璃破碎以致发生不安全事件发生。

4.3 沸腾液体扩展蒸气云爆炸 (BLEVE) 范围模拟

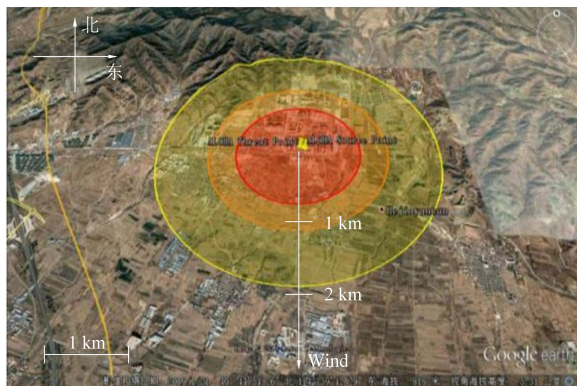
ALOHA 软件可以模拟沸腾液体扩展蒸气云

爆炸 (BLEVE) 事故发生后热辐射的破坏范围。其中导致人员死亡的热辐射强度为 10 kW/m^2 、重伤的热辐射强度为 5.0 kW/m^2 、轻伤的热辐射强度 2.0 kW/m^2 。由 ALOHA 软件模拟结果如图 7(a)所示,将模拟结果在 Google Earth 进行拟合,结果如图 7(b)所示。

由模拟结果可得,发生事故后以泄漏点为中心,致命危险区域的范围是 800 m,该区域内人员接触热辐射后可能会在发生死亡,可能造成烧伤的范围为 1 100 m,在 2 000 m 范围内人员接触热辐射 60 s 便会产生疼痛感。由于 BLEVE 爆炸产生的热辐射伤害破坏力最强,因此罐区应加强对储罐的检查。若发生泄漏事故,处置过程中禁止火源,将发生爆炸事故的可能性降到最低。



(a) BLEVE热辐射影响范围



(b) BLEVE热辐射影响范围Google Earth拟合结果

图 7 沸腾液体扩展蒸气云爆炸 (BLEVE) 热辐射影响范围

Fig.7 Area affected by thermal radiation of the BLEVE accident

5 结论

通过 ALOHA 软件对化工厂氯乙烯泄漏事故模拟分析,以本文在软件中设定的基本参数为前提,得到以下结论:

(1) 氯乙烯储罐泄漏,有毒气体扩散事故影响范围划分为 3 个级别:一级致毒区域 (AEGL-1) 的范围为下风侧 1 000 ~ 2 500 m;二级致毒区域 (AEGL-2) 的边界为下风侧 483 ~ 1 000 m;三级致毒区 (AEGL-3) 氯乙烯储罐泄漏点下风侧 483 m 的范围内。

(2) 蒸气云爆炸事故热辐射影响范围的第 1 警戒线区域约占面积 $231 \text{ m} \times 200 \text{ m}$,此区域遇到火源必然会发生爆炸事故;第 2 警戒线属于潜在爆炸事故危险区面积为 $561 \text{ m} \times 280 \text{ m}$;第 3 警戒线内氯乙烯浓度低,发生爆炸事故的概率较小。

蒸气云爆炸的冲击波影响范围,红色警戒线内半径约为 214 m,橙色警戒线内半径约 298 m 圆形区域覆盖农田及村庄,黄色警戒线半径约 621 m 区域覆盖面积较大。

(3) 沸腾液体扩展蒸气云爆炸事故,氯乙烯泄漏储罐周围 800 m 范围内的人员接触热辐射后有致命危险,可能造成人员烧伤的事故范围为 1 100 m,在 2 000 m 范围内人员接触热辐射 60 s 会产生疼痛感。

参考文献

- [1] 米立华,刘何清,鲁义,等. 一氧化碳储罐泄漏事故的数值模拟 [J]. 矿业工程研究, 2018, 33 (4): 51-55.
- [2] Croce A, Grosshandler W L, Bukowski R W, et al. The international FORUM of fire research directors: A position paper on performance-based design for fire code applications [J]. Fire Safety Journal, 2008, 43: 234-236.

- [3] 梁虎. ALOHA 软件对危化品泄漏区域分布的预测 [J]. 安全, 2007 (2): 30-32.
- [4] 相艳景, 刘茂, 张永强, 等. ALOHA 软件模拟分析环氧乙烷储罐泄漏事故 [J]. 中国公共安全 (学术版), 2008 (Z1): 49-53.
- [5] 闫洁洁, 向晓东, 霍艳霞. 典型液氯泄漏危害的 ALOHA 软件估算 [J]. 化工环保, 2015, 35 (1): 69-73.
- [6] 田水承, 周可柔. 基于 ALOHA 的氯乙烯储罐泄漏事故模拟研究 [J]. 西安科技大学学报, 2018, 38 (2): 187-192+201.
- [7] 王春华. 液氯泄漏事故后果风险研究 [J]. 江苏氯碱, 2013 (6): 9-13.
- [8] 邵辉, 候丽娟, 段国宁, 等. ALOHA 在苯泄漏事故中的模拟分析 [J]. 常州大学学报 (自然科学版), 2012, 24 (3): 48-52.
- [9] 焦姣, 张静, 姬亚芹, 等. ALOHA 在突发性大气污染事故中的应用 [J]. 安全与环境学报, 2015, 15 (3): 151-155.
- [10] 朱云峰, 孙峰, 金满平, 等. 基于 ALOHA 软件模拟环氧丙烷储罐泄漏事故 [J]. 安全、健康和环境, 2017, 17 (8): 5-9.
- [11] Anjana NS, Amarnath A, Nair M V H. Toxic hazards of ammonia release and population vulnerability assessment using geographical information system [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 210: 201-209.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50160—2008 石油化工企业设计防火规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [13] 崔克清, 陶刚. 化工工艺及安全 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 290-320.
- [14] 吴萍, 饶国宁. 基于 ALOHA 软件的氯乙烯储罐泄漏事故模拟与分析 [J]. 安全与环境工程, 2017, 24 (1): 162-167.
- [15] D. G. E. Grigoriadis, J. G. Bartzis, A. Goulas. Efficient treatment of complex geometries for large eddy simulations of turbulent flows [J]. Computers and Fluids, 2004, 33 (2): 201-222
- [16] 张丽. 室内燃气泄漏扩散及燃烧爆炸的数值模拟 [D]. 太原: 中北大学, 2015: 40-42.
- [17] American Institute of Chemical Engineers. Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVEs [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc.: 1994: 157-246.
- [18] 孙启悦, 修光利, 张大年. CAMEO 在突发性环境污染事故应急中的应用 [J]. 安全与环境学报, 2008 (3): 145-149.