

化工园区氯苯扩散模型仿真研究

申元霞^{a,b}, 孙恨恨^a, 张学锋^{a,b}

安徽工业大学 a. 计算机科学与技术学院; b. 特种重载机器人安徽省重点实验室, 安徽 马鞍山 243032

摘要:目的 为了更准确地预测泄漏的影响范围,更好地降低化工园区内氯苯泄漏所造成的损害,提出了一种氯苯泄漏的模拟仿真方法。方法 采用高斯模型中的烟雨模型作为氯苯泄漏扩散的数学模型;用 Unity3d 建立化工园区的三维虚拟场景,利用粒子系统、动画系统和 Shader 渲染等技术,对氯苯连续性泄漏扩散的动态变化进行三维仿真模拟。结果 以某化工园区的真实储罐数据建立三维仿真模型,在模型的基础上实现了氯苯泄漏过程中的动态演化的三维仿真效果,能够直观看到泄漏的蔓延情况,并从泄漏时间、大气稳定度、风速 3 个方面对氯苯扩散的影响进行了对比分析,展现出了仿真模拟较高的真实性。结论 氯苯泄漏的仿真模拟提供了直观的可视化方式,对化工园区三维应急救援仿真演练的最优处置过程提供了良好的数据支持,结合氯苯损害准则,科学、准确地预测氯苯蔓延造成的危害范围,有助于指导化工园区的氯苯储罐的布局。

关键词:氯苯扩散模型;高斯烟雨模型;C/S 结构;三维仿真;应急救援仿真演练

中图分类号:TP311.1 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2025.0002.016

Simulation Study of Chlorobenzene Diffusion Model in Chemical Industrial Park

SHEN Yuanxia^{a,b}, SUN Henhen^a, ZHANG Xuefeng^{a,b}

a. School of Computer Science and Technology; b. Anhui Key Laboratory of Special Heavy-duty Robotics, Anhui University of Technology, Anhui Ma' anshan 243032, China

Abstract: Objective To more accurately predict the impact range of leakage and better reduce the damage caused by chlorobenzene leakage in chemical industrial parks, a simulation method for chlorobenzene leakage was proposed.

Methods The smoke and rain model in the Gaussian model was used as the mathematical model for chlorobenzene leakage diffusion. A three-dimensional virtual scene of the chemical industrial park was established using Unity3D, and technologies such as particle systems, animation systems, and Shader rendering were utilized to simulate the dynamic changes in chlorobenzene continuous leakage diffusion in three dimensions. **Results** A three-dimensional simulation model was established based on real tank data from a chemical industrial park, which realized the three-dimensional simulation effect of the dynamic evolution of chlorobenzene leakage and allowed for the intuitive observation of the spread of leakage.

A comparative analysis of the effects of chlorobenzene diffusion from three aspects: leakage time, atmospheric stability, and wind speed, demonstrates the high realism of the simulation. **Conclusion** The simulation of chlorobenzene leakage provides a visual and intuitive method and provides good data support for the optimal disposal process of three-dimensional

收稿日期:2023-03-07 修回日期:2023-05-12 文章编号:1672-058X(2025)02-0120-07

基金项目:安徽高校自然科学基金项目(KJ2019A0063);安徽高校自然科学基金项目(2022AH050290)。

作者简介:申元霞(1979—),女,安徽六安人,博士,副教授,从事智能优化算法与数据挖掘研究。

通讯作者:张学锋(1978—),男,河北石家庄人,博士,教授,硕士生导师,从事虚拟现实技术与人工智能研究。Email: zxf_06@ahut.edu.cn.

引用格式:申元霞,孙恨恨,张学锋.化工园区氯苯扩散模型仿真研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2025,42(2):120-126.

SHEN Yuanxia, SUN Henhen, ZHANG Xuefeng. Simulation study of chlorobenzene diffusion model in chemical industrial park [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2025, 42(2): 120-126.

emergency rescue simulation drills in chemical industrial parks. By combining chlorobenzene damage criteria, the simulation scientifically and accurately predicts the extent of harm caused by chlorobenzene spreading, which helps guide the layout of chlorobenzene storage tanks in chemical industrial parks.

Keywords: chlorobenzene diffusion model; Gaussian smoke and rain model; C/S structure; 3D simulation; emergency rescue simulation drill

1 引言

氯苯在工业应用中十分常见,但伴随而来的是潜在的安全风险,这些风险包括氯苯引发爆炸对人体健康的损害和对环境造成的污染。为了分析氯苯泄漏的扩散趋势,国内外许多专家已经展开了广泛的研究工作,并研发了氯苯泄漏扩散模型和仿真工具。这些模型和工具能够预测氯苯泄漏事件的影响范围,从而协助相关部门采取适当的措施,以减少事故对人体健康和环境所带来的潜在危害。

泄漏事故的研究最早可追溯到 19 世纪 70 年代,国外学者提出了许多数学模型,比较成熟的扩散模型有 B&M 模型、CFD 模型、Gaussian 模型、Sutton 模型等^[1]。Britter R E 和 McQuaid 等^[2-3]深入剖析 B&M 模型,根据实验数据绘制曲线图,并利用关系曲线方程反映重气泄漏瞬间的近地面扩散数学规律,但是该模型无法解决非连续的泄漏过程以及高空喷射泄漏等复杂问题。Englang 等^[4]首次将 CFD 模型应用于非常态湍流运动中的重气扩散,并以可视化的方式展示了重气在三维空间中的扩散规律,虽然可视化效果较好,但可能代表不了真正的流动状态。Gaussian 模型因其计算简单、物理定义明确,数据分析和处理量级小等特点^[5],在众多气体扩散模型中脱颖而出。Regis Briant 等^[6]在凹凸路面上通过递减风速,对气体排放物浓度进行 Gaussian 模型修正,降低了计算误差,但模型需要考虑多种因素,模型的参数化和初始化需要相对复杂。N. Kh. Arystanbekova 利用笛卡尔坐标系代替单个直角坐标系,将高斯烟雨模型应用于复合点源的浓度计算中,同时修正了烟云的有效高度^[7],但该模型的参数较多,且每个参数对模拟结果的影响较为敏感,需要进行复杂的参数校准和验证。

我国最早的 HLY 模型^[8]仅能预测气体浓度的空间分布和对人体造成伤害的区域。在研究油罐泄漏扩散过程中,肖开喜等^[9]利用改进的高斯烟团模型模拟不同大气稳定度及不同环境风速下的油气浓度分布规律,并通过模拟结果对危险区进行了划分。栗帅等^[10]对非纯 CO₂ 泄漏过程中的动态物理参数进行了解析,仅对不同范围的伤害距离做了定量分析。田忠等^[11]将

GIS 设备应用在 SF₆ 气体泄漏浓度的检测中,采用离子迁移法结合差分能量检测算法,提高了最佳气体填充范围的寻优能力,但是并不能满足扩散趋势预测,而且对于氯苯泄漏的三维效果较差。

基于氯苯扩散的深入研究比较少,以及充分了解各模型的优缺点的基础之上,选取高斯模型作为氯苯泄漏仿真演练的扩散模型。通过 Unity3D 引擎,运用虚拟现实技术,实现了高斯模型对氯苯泄漏扩散进行三维仿真研究,提供了泄漏扩散过程的可视化方式,直观地观察动态的氯苯连续性泄漏蔓延情况,有助于参数研究、应急规划和环境影响评估,为准确理解和处理氯苯泄漏事件提供了有力工具。以某化工园区为背景,结合某化工园区重特大危化品事故演练预案,将氯苯泄漏模型理论与现场真实操作环境相结合,对氯苯泄露的范围进行分析。判断其对周围人员生命安全的影响程度,为化工企业制定应急方案提供科学依据。

2 氯苯介绍及泄漏扩散模型

2.1 氯苯理化性质及危害性

氯苯是工业中最主要的产品之一,可直接用作溶剂、杀虫剂、除臭剂和化学中间体^[12],它的理化性质如表 1 所示。

表 1 氯苯理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of chlorobenzene

性 质	内 容
外观与性状	无色透明液体,具有苦杏仁味
相对密度	1.107 5 g/cm ³
熔点、沸点、闪点	-45.2 °C、132.2 °C、29 °C
饱和蒸气压	1.17 kPa(20 °C)
临界压力	4.52 MPa
临界温度	359.2 °C
引燃温度	638 °C
燃烧性	易燃
燃烧分解物	一氧化碳、二氧化碳、氯苯
溶解性	不溶于水,溶于乙醇、乙醚、氯仿、二硫化碳、苯等多数有机溶剂

氯苯是一种有机化合物,其化学性质非常活泼,易于在高温或接触氧化剂时发生爆炸。一旦发生泄漏,其液

体及燃烧分解物对人体和环境都会造成严重危害。

对于人体而言,氯苯的危害主要表现在中毒和麻痹中枢神经系统方面。如果通过呼吸道吸入氯苯,会导致头痛、头晕、恶心、呕吐、眼睛和喉咙灼热等症状,严重时还会出现晕厥和记忆力衰退等症状。如果长时间接触氯苯,还会对肾脏产生损害,诱发肾脏病变。如果氯苯沾到皮肤上,长时间未得到正确的处理,可能会导致皮肤感染。

对于环境而言,氯苯泄漏会对水体、土壤和大气造成不同程度的污染。如果氯苯泄漏到水中,会导致水体污染,对水生生物产生严重危害,可能会引起鱼类死亡、水草枯萎等问题,对整个水生态系统造成破坏。如果氯苯泄漏到土壤中,会导致土壤污染,影响土壤质量,破坏生态平衡,甚至可能影响到地下水资源的安全。如果氯苯泄漏到大气中,会导致空气污染,给人们的健康带来威胁,可能会引起眼部、呼吸系统等疾病,长期接触甚至会增加患癌症的风险。

2.2 氯苯泄漏扩散模型

氯苯泄漏扩散模型是一种用来描述氯苯在空气中扩散和传播的模型。它可以通过数学模型来计算氯苯在空气中的浓度分布和传播路径,从而帮助人们了解和预测氯苯泄漏事故的影响范围和危害程度。在研究氯苯泄漏扩散的过程中,可以将其分为因突发情况导致的瞬时性泄漏扩散和泄漏发生到堵漏作业完成期间的连续性扩散。瞬时性泄漏扩散是指氯苯在一瞬间发生泄漏,随后在空气中扩散。连续性扩散则是指氯苯的泄漏源持续不断地向外释放气体,气体随后在空气中扩散。通过对扩散模型研究现状的论述以及其他相关文献资料的对比分析,高斯模型比较适合作为本文的泄漏扩散模型。

高斯模型是目前较为广泛采用的气体扩散模型,其基于统计理论中的正态分布假设,从而分析气体扩散的模式。高斯模型分为两种主要类型:烟团模型和烟雨模型。烟团模型假设污染气体云的体积会在水平和垂直方向上逐渐增大,以模拟污染气体云在时间和空间上的变化。因此在突发性气体泄漏事件中,通常情况下,有害气体会在短时间内突然释放,这种情况下适合采用高斯烟团模型来估算地面上的污染浓度。烟雨模型能够更好地考虑气体释放的持续性、缓慢变化和相对较长时间内的扩散过程,因此烟雨模型更适用于连续性气体泄漏^[13]。与其他泄漏扩散模型相比,高斯模型具有计算简单、精度高等优点,已被广泛应用于氯苯泄漏扩散的研究中。然而该模型也存在一定的局限性,例如无法考虑地形、建筑物等因素对气体扩散的影响,因此在实际应用中需要结合实际情况进行分析和判断。

2.3 瞬时性泄漏扩散模型

瞬时性泄漏扩散模型,即高斯烟团模型,根据张帝等^[14]的描述,对本系统中氯苯储罐瞬间爆炸泄漏进行定量分析,其计算如下:

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{(x-\bar{u}t)^2}{2\sigma_x^2}\right] \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

式(1)中, $C(x, y, z, t)$ 为 t 时刻坐标 (x, y, z) 处的氯苯浓度(kg/m^3); Q 为氯苯泄漏源的泄漏强度(kg/s); \bar{u} 为当前环境下的平均风速(m/s); H 为泄漏源的有效高度(m); σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为 x 、 y 、 z 轴的扩散系数(m),且 $\sigma_x = \sigma_y = \gamma_1 x^{\alpha_1}$, $\sigma_z = \gamma_2 z^{\alpha_2}$,系数 γ_1 、 α_1 、 γ_2 、 α_2 根据大气稳定度来确定对应参数。

化工厂突发事故时风速不是一成不变的,为此,可将动态变化的风速模型融入式(1),这样能较好地模拟出事故现场真实情况。将瞬时性泄漏的氯苯当作烟团,其内部的分子扩散满足正态分布,烟团整体在动态风场中运动^[15]。单位氯苯分子的烟团可用式(2)表示:

$$S = f(Pos, u, \sigma, Q, t) \quad (2)$$

式(2)中, Pos 为烟团的中心位置; u 为当前环境下的风速(m/s); σ 为单位氯苯分子扩散系数。

式(1)中,用 \bar{u} 、 t 来描述烟团位置,没有将实时运动轨迹和停留位置考虑进来。所以,要想求解任意时刻的烟团位置,可对当前环境下的风速 u 求积分,计算如式(3)所示:

$$Pos = \int_0^t u dt \quad (3)$$

假设时间步长 $\Delta t \rightarrow 0$,可用累计平均移动距离计算单位氯苯分子的位移,计算公式如式(4):

$$Pos_{i,j+1} = Pos_{i,j} + u_j \Delta t \quad (4)$$

式(4)中, $Pos_{i,j+1}$ 为第 i 个氯苯分子在 $(j+1)$ 时刻的位置; $Pos_{i,j}$ 为第 i 个氯苯分子在 j 时刻的位置; u_j 为 j 时刻的风速; Δt 为时间步长。对应于式(4),中间变量 u_j 可由式(5)计算得出:

$$u_j = \bar{u}_j + \bar{u}_j \quad (5)$$

式(5)中, \bar{u}_j 为 j 时刻的平均风速; \bar{u}_j 为 j 时刻的动态风速。

\bar{u}_j 可以通过采样计算平均值求出,而 \bar{u}_j 的计算可以利用随机过程模拟,其计算如下:

$$\bar{u}_j = \bar{u}_{j-1} R_L + \delta \sqrt{1 - R_L^2} \xi \quad (6)$$

式(6)中, \bar{u}_{j-1} 为 $(j-1)$ 时刻的动态风速; R_L 为拉格朗日相关系数; δ 为速度的标准方差,由半经验公式^[16]得

到; ξ 为服从 $X-N(0,1)$ 的标准正态分布。

j 时刻第 i 个氯苯分子扩散符合正态分布,其烟团模型如下:

$$C_i(x,y,z,t) = \frac{Q(i)}{(2\pi)^{\frac{3}{2}}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{(x-x_{i,j})^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_{i,j})^2}{2\sigma_y^2}\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-z_{i,j})^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+z_{i,j})^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (7)$$

式(7)中, $Q(i)$ 为第 i 个氯苯分子的质量(kg); $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$ 为 j 时刻第 i 个氯苯分子的坐标。

将所有时刻的浓度贡献值 $C_i(x,y,z,t)$ 累加即可求得任意时刻的氯苯扩散浓度 $C(x,y,z,t)$,如公式(8):

$$C(x,y,z,t) = \sum_i C_i(x,y,z,t) \quad (8)$$

2.4 连续性泄漏扩散模型

连续性泄漏扩散模型,即高斯烟雨模型,模型的使用是有一定前提条件的,具体假设^[17]如下:

(1) 环境中大气压强稳定,风速大小、方向不随时间、地点而改变;

(2) 泄漏扩散过程中,气体总量恒定不变;

(3) 气体扩散浓度在 y,z 轴上符合正态分布;

(4) 泄漏源源强连续且均匀。

在上述假设条件成立的前提下,高斯烟雨模型可用式(9)表示:

$$C(x,y,z,H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (9)$$

式(9)中, $C(x,y,z,H)$ 为坐标 (x,y,z) 处的氯苯浓度(kg/m^3); Q 为氯苯泄漏源的泄漏强度(kg/s); u 为当前环境下的风速(m/s); H 为泄漏源的有效高度(m); σ_y, σ_z 为扩散系数,与大气稳定性和水平距离 x 有关, $\sigma_y = \gamma_1 x^{\alpha_1}, \sigma_z = \gamma_2 x^{\alpha_2}$ 。

大气稳定性是指在大气中某一高度上的气团在垂直方向上的相对稳定程度。如果给一团空气一个初始作用力,使其作向上的垂直运动,垂直运动的气块在外力消失后,又逐渐回到原来的位置,这种状况的大气是稳定的;当外力消失后,气块仍继续上升,甚至加速前进,这种状况的大气是不稳定的;当外力消失后,气块停留在其已到达的位置,既不上升也不下降,这种状况的大气处于中性状态。

《环境影响评价技术导则》中介绍了用常规的地面观测资料划分大气稳定度的方法。大气稳定度的分类方法采用经过修正的帕斯奎尔(Pasquill)稳定度分级法(Ps),将大气扩散稳定度分为6个等级:A、B、C、D、E、

F,分别表示强不稳定、不稳定、弱不稳定、中性、弱稳定和稳定。确定等级时首先根据云量与太阳高度角按表2查出太阳辐射等级数,再由太阳辐射等级数与地面风速按下表查找稳定度等级。其中,太阳辐射等级数如表2所示,大气温度的等级如表3所示。

表2 太阳辐射等级数

云量 1/10	太阳辐射等级数				
	夜间	$h \leq 15^\circ$	$15^\circ < h \leq 35^\circ$	$35^\circ < h \leq 65^\circ$	$h > 65^\circ$
总云量/低云量					
$\leq 4/\leq 4$	-2	-1	+1	+2	+3
$5 \sim 7/\leq 4$	-1	0	+1	+2	+3
$\geq 8/\leq 4$	-1	0	0	+1	+1
$\geq 5/5 \sim 7$	0	0	0	0	+1
$\geq 8/\geq 8$	0	0	0	0	0

表3 大气稳定度的等级

风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	太阳辐射等级					
	+3	+2	+1	0	1	2
≤ 1.9	A	A~B	B	D	E	F
2~2.9	A~B	B	C	D	E	F
3~4.9	B	B~C	C	D	D	E
5~5.9	C	C~D	D	D	D	D
≥ 6	D	D	D	D	D	D

3 氯苯泄露模拟

3.1 氯苯扩散数学模型

氯苯通常储存在远离火种、热源的密封容器内,一旦发生泄漏,氯苯泄漏时液氯及瞬间产生的有毒氯苯烟雾几乎同时扩散,最初的烟雾密度远高于空气密度,因此会导致烟雾下沉。随着时间的推移和气体的稀释,烟雾的密度逐渐减小,符合非重气的扩散条件。因此,结合氯苯泄漏的特点和持续时间等因素,选择连续性泄漏扩散的高斯烟雨模型作为氯苯泄漏扩散的数学模型是非常合理的。高斯烟雨模型是一种连续性泄漏扩散模型,可以用于预测氯苯泄漏在空气中的扩散情况。模型基于高斯函数,通过测量氯苯泄漏源的特征参数,如泄漏速率、气象条件等,可以计算出氯苯在空气中的扩散范围和浓度分布情况。考虑氯苯泄漏后烟雾密度的变化和扩散过程的持续时间,使用高斯烟雨模型可以更准确地预测泄漏的影响范围和采取相应的措施。

3.2 氯苯扩散数值模拟

氯苯扩散数值模拟是在式(9)的基础上做的进一步研究,需要探讨的内容如下:

(1) 氯苯泄漏源泄漏强度 Q 的确定。单位时间氯苯泄漏源泄漏强度 Q 可以根据流体力学的伯努利方程

计算^[18],如式(10):

$$Q = CA \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (10)$$

式(10)中, C 为泄漏系数,取值为1; A 为储罐破裂处的面积(m^2); ΔP 为储罐内部压力与当前环境压力差(MPa); ρ 为泄漏液体密度(kg/m^3),氯苯的密度为 $1\ 107.5\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

对应于式(10),中间变量 A , ΔP 的计算方法如式(11)、式(12):

$$A = \pi \left(\frac{d_A}{2} \right)^2 \quad (11)$$

$$\Delta P = P - P_0 \quad (12)$$

式(11)中, d_A 为储罐破裂处的直径(m),系统中默认储罐破裂形状为圆形;式(12)中, P 为储罐内部压力(MPa); P_0 为当前环境压力(MPa)。

(2) 扩散系数 σ_y, σ_z 的确定。扩散系数 σ_y, σ_z 的主要影响因素是大气稳定度,通常采用Pasquill的分类方法将大气稳定度划分为A~F等6个等级,由A到F大气越来越稳定。Pasquill-Gifford模型扩散系数方程^[19]如表4所示。

表4 Pasquill-Gifford模型扩散系数方程
Table 4 Diffusion coefficient equations for the Pasquill-Gifford model

大气稳定度	σ_y/m	σ_z/m
A	$0.22x/(1+0.000\ 1x)^{0.5}$	$0.20x$
B	$0.16x/(1+0.000\ 1x)^{0.5}$	$0.12x$
C	$0.11x/(1+0.000\ 1x)^{0.5}$	$0.08x/(1+0.000\ 2x)^{0.5}$
D	$0.08x/(1+0.000\ 1x)^{0.5}$	$0.06x/(1+0.001\ 5x)^{0.5}$
E	$0.06x/(1+0.000\ 1x)^{0.5}$	$0.03x/(1+0.000\ 3x)$
F	$0.04x/(1+0.000\ 1x)^{0.5}$	$0.016x/(1+0.000\ 3x)$

备注:方程中 σ 为下风向距离,单位为m

(3) 泄漏源有效高度 H 的确定。泄漏源有效高度 H 可近似看成两个部分组成,计算公式如式(13):

$$H = H_0 + \Delta H \quad (13)$$

式(13)中, H_0 为泄漏源到地面的垂直高度(m); ΔH 为泄漏源到泄漏气体上升的变化高度(m)。

式(13)中的 ΔH 可由式(14)近似计算:

$$\Delta H = 12v_0 d_A / 5u \quad (14)$$

式(14)中, v_0 为泄漏气体的初始速度(m/s); d_A 为储罐破裂处的直径(m); u 为式(9)中提到的当前环境下的风速(m/s)。

3.3 氯苯泄漏仿真及可视化方法

选取其中一个氯苯储罐为研究对象,对其氯苯烟雾浓度扩散范围和扩散效果进行可视化展示,模拟了不同情况下的氯苯烟雾浓度扩散。

以3DsMax为建模软件对氯苯储罐进行建模,通过对氯苯扩散数学模型以及扩散数值的模拟分析,可以使用Shader渲染技术、粒子系统与C#技术实现氯苯泄漏仿真,主要过程如下:

(1) 创建粒子系统,需要创建的有氯苯气体,确定颜色、形状。

(2) 设置系统参数,根据氯苯的特性,在其属性面板中,设置各自的发射周期、用氯苯粒子数量模拟氯苯的泄漏强度。

(3) 设置操作方式,根据粒子属性和连续性泄漏扩散模型的公式,设置粒子的模拟速度、模拟空间、缩放模式、旋转角度、是否受重力等因素。

(4) C#脚本更新迭代,通过代码控制整个系统的泄漏扩散,包括粒子的触发条件、终止条件等。

3.4 氯苯泄漏仿真及可视化展示

(1) 风向恒定,风速变化。设风向恒为东风,选取的风速按风力等级划分为1级、2级、3级、5级,不同风速下氯苯烟雾浓度扩散趋势如图1至图4所示。

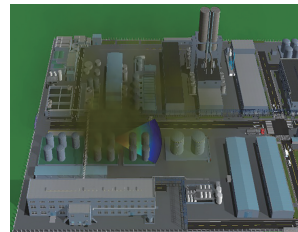


图1 东风1级

Fig. 1 East wind level 1

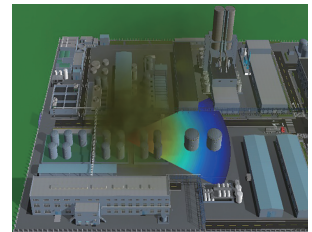


图2 东风2级

Fig. 2 East wind level 2

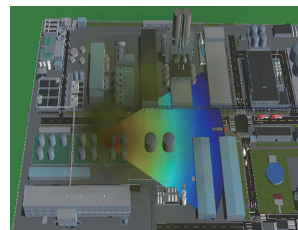


图3 东风3级

Fig. 3 East wind level 3

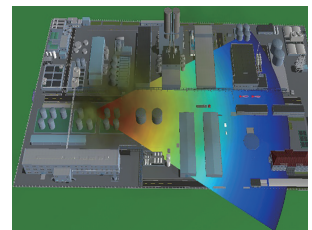


图4 东风5级

Fig. 4 East wind level 5

(2) 风速恒定,风向变化。设风速等级为2级,选取的风向划分为东风、南风、西风、北风,不同风向下氯苯烟雾浓度扩散趋势如图5至图8所示。

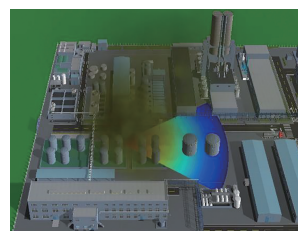


图5 东风2级

Fig. 5 East wind level 2

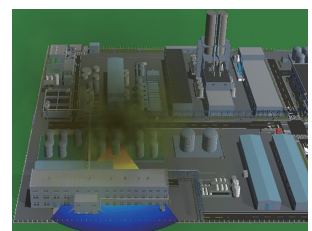


图6 南风2级

Fig. 6 South wind level 2

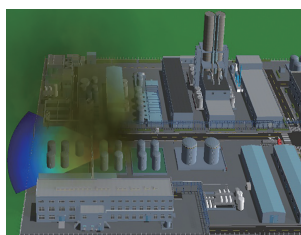


图 7 西风 2 级

Fig. 7 West wind level 2

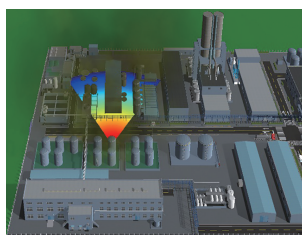


图 8 北风 2 级

Fig. 8 North wind level 2

4 泄漏扩散实验分析

4.1 泄漏时间对扩散的分析

在仿真模型中选取某一氯苯储罐为研究对象,分析泄漏时间对扩散距离的影响,模拟了 4 种不同风速情况下,氯苯泄漏位置下风向扩散距离随时间的变化轨迹。分别模拟了当风速为 3 m/s、5 m/s、7 m/s 和 10 m/s 的情况下氯苯的泄漏轨迹,如图 9 所示。从整体趋势上来看,泄漏时间越长,氯苯烟雾扩散距离越远。根据氯苯泄漏瞬间产生的烟雾密度大的特点,前 15 s 内风速对扩散距离的影响较小,随着泄漏的进行,风速的影响愈发明显。在扩散过程中,浓度会不断被稀释,直到 70 s 时,风速为 3 m/s 下的最远扩散距离为 106 m,风速为 10 m/s 下的最远扩散距离长达 319 m,两者之间的差距最大。因此,当氯苯泄漏浓度被逐渐稀释后,泄漏时间与扩散距离呈正相关关系更加明显。同时,相同时刻下,风速越大,扩散距离越远,且变化趋势越明显。

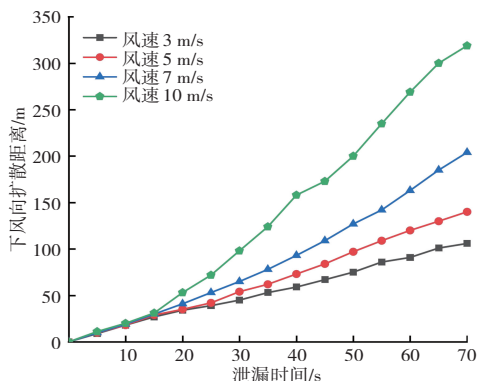


图 9 不同风速下风向扩散距离随时间变化轨迹

Fig. 9 Trajectories of wind dispersion distance with time for different wind speeds

4.2 大气稳定度对扩散的分析

按照 Pasquill 分类法将大气稳定度划分为 A~F 等 6 个等级,从 A 到 F 大气越来越稳定。由图 10 的折线图可知,大气稳定度等级与下风向扩散距离成正比。控制其他量不变,分析 4 种不同氯苯储罐泄漏破裂处的口径对扩散距离的影响,分别是 50 mm 口径,100 mm 口径,200 mm 口径和 400 mm 口径情况霞的泄漏情况。每种泄漏扩散趋势大体相同,但口径越大,下风向扩散距离越远。根据下图变化趋势,当大气稳定度等级介于 A~D 之间时,对下风向扩散距离的影响较为缓和;当大气稳定度等级超过 D 级后,对下风向扩散距离的

影响突增。因此,大气越稳定,导致扩散距离越远,对厂区下风向周边环境的影响越大。

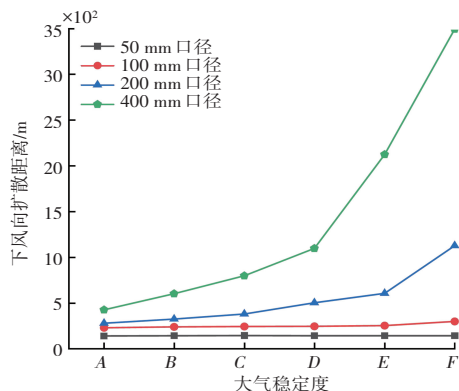


图 10 同口径下风向扩散距离随大气稳定度变化轨迹

Fig. 10 Trajectories of downwind diffusion distance with atmospheric stability of the same caliber

4.3 风速对扩散的分析

实验结果表明,风速大小对扩散距离有促进作用。图 11 分析了 4 种不同氯苯储罐泄漏口径下风向扩散距离随风速的变化轨迹,与短时间内的扩散有所不同,大气达到稳态后,下风向扩散距离与风速成反比。探究其原因不难发现,初期泄漏气体尚未达到稳定,泄漏速率远大于扩散速率,风速对扩散的影响是较小的。4 种不同口径下的下风向扩散距离随风速的变化趋势相同,风速一定时,泄漏口径越大,扩散距离越远。

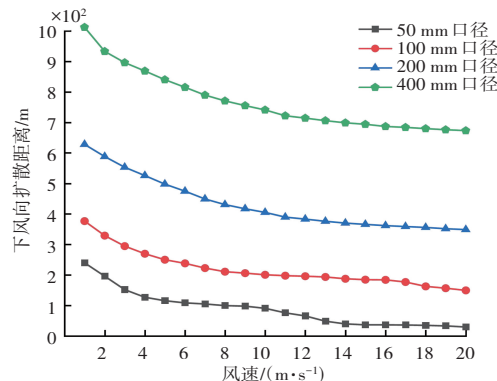


图 11 不同口径下风向扩散距离随风速变化轨迹

Fig. 11 Trajectories of downwind diffusion distance with wind speed for different calibers

5 结论

建立的氯苯模型,以江苏某化工园区的三维场景进行了仿真计算,得到在不同风向和风速的情况下,氯苯泄露范围和强度随动态演化过程。仿真结果对企业三维应急救援仿真演练的最优处置过程提供了良好的数据支持,模拟方法已在 3 个企业的化工园区应急救援演练得到了运用,企业定期进行了仿真演练,演练效果得到了大家的一致好评。根据氯苯损害准则科学、准确地模拟氯苯蔓延范围并评估潜在的危害,这对于指导各个企业的化工储罐的布局起到了重要的作用。同时仿真结果用于制定现场真实的应急救援方案。这

些方案可以根据具体情况进行调整,并且可以根据不同的风向和风速条件来优化。这将有助于企业提高应对氯苯泄漏事件的准备性,从而最大限度地减少潜在的风险和损失,对现场真实的应急救援方案也起到了较好的支持作用。

参考文献(References):

- [1] SRINIVASAN R S, GERTH W A, POWELL M R. A mathematical model of diffusion-limited gas bubble dynamics in tissue with varying diffusion region thickness[J]. *Respiration Physiology*, 2000, 123(1), 153–164.
- [2] EISNER H S. Workbook on the dispersion of dense gases[J]. *Journal of Occupational Accidents*, 1989, 11(2): 149–.
- [3] MARKIEWICZ M T. Mathematical modeling of the heavy gas dispersion[M]. Beijing: Institute of Atomic Energy, 2006.
- [4] ENGLANG W G, TEUSCHERLH L H, HAUSER L E. Atmospheric dispersion of liquefied natural gas vapor clouds using SIGMET, a three-dimensional time dependent hydrodynamic computer model[C]//Proceedings of the Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute. Stanford, California, US: Stanford University Press, 1978: 4–20.
- [5] CAO B, CUI W, CHEN C, CHEN Y. Development and uncertainty analysis of radionuclide atmospheric dispersion modeling codes based on Gaussian plume model[J]. *Energy*, 2020, 194(C): 116925. 1–116925. 11.
- [6] BRIANT REGIS, KORSAKISSOK LRENE, SEIGNEUR C. An improved line source model for air pollutant dispersion from roadway traffic[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 45(24): 4099–4107.
- [7] ARYSTANBEKOVA N K. Application of Gaussian plume models for air pollution simulation at instantaneous emissions [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2004, 67(4): 451–458.
- [8] 化工部化工劳动保护研究所. 重要有毒物质泄漏扩散模型研究[J]. 1996(3): 1–19.
Institute of Chemical Labour Protection, Ministry of Chemical Industry. Dispersion modelling of leakage of important toxic substances[J]. 1996 (3): 1–19.
- [9] 肖开喜, 侯磊, 黄亚楠, 等. 油罐泄漏扩散过程中罐区油气浓度分布规律数值模拟[J]. *油气储运*, 2022(8): 1–8.
XIAO Kai-xi, HOU Lei, HUANG Yan-nan, et al. Numerical simulation of oil and gas concentration distribution law in tank area during the diffusion process of oil tank leakage[J]. *Oil and Gas Storage and Transportation*, 2022 (8): 1–8.
- [10] 栗帅, 张一梅, 王维波, 等. 超临界非纯 CO₂ 输送管道区域人类健康风险评估的 QRA 概率模型及应用[J]. *环境工程*, 2021, 39(5): 225–230.
LI Shuai, ZHANG Yi-mei, WANG Wei-bo, et al. QRA probabilistic model and application for human health risk assessment of supercritical non-pure CO₂ transport pipeline area[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39 (5): 225–230.
- [11] 田忠, 常敏, 金海勇, 等. 电力系统智能化运维中 GIS 设备 SF₆ 气体泄漏检测方法研究[J]. *计算机测量与控制*, 2022(8): 1–7.
TIAN Zhong, CHANG Min, JIN Hai-yong, et al. Research on SF₆ gas leakage detection method of GIS equipment in intelligent operation and maintenance of power system[J]. *Computer Measurement and Control*, 2022 (8): 1–7.
- [12] 冯汉青, 王娟娟, 杜变变, 等. 氯苯处理下小麦幼根生理学指标的变化及活性炭对氯苯毒性缓解作用的研究[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(2): 72–78.
FENG Han-qing, WANG Juan-juan, DU Bian-bian, et al. Changes in physiological indexes of young wheat roots under treatment with chlorobenzene and the mitigating effect of activated charcoal on the toxicity of chlorobenzene[J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 57 (2): 72–78.
- [13] FERNANDES A P, RAFAEL S, LOPES D, et al. The air pollution modelling system URBAIR: how to use a Gaussian model to accomplish high spatial and temporal resolutions[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2021(14): 1969–1988.
- [14] 张帝, 毛占利, 龚美玲, 等. 基于 Floyd 的化工园区毒气泄漏人员疏散路径规划[J]. *消防科学与技术*, 2021, 40(10): 1475–1478.
ZHANG Di, MAO Zhan-li, GONG Mei-ling, et al. Evacuation path planning for toxic gas leakage in chemical park based on Floyd [J]. *Fire Science and Technology*, 2021, 40 (10): 1475–1478.
- [15] LI K, LIANG M C, SU F G. Data assimilation method for atmospheric dispersion based on a Gaussian puff model[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2018, 58(11): 992–999.
- [16] GE B Z, LU Q Q, CHEN X S, WANG Z F. Review on numerical simulation of radionuclide atmospheric diffusion [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 41(5): 1599–1609.
- [17] 李万莉. 基于高斯模型的复杂地形下天然气泄漏扩散特性研究[D]. 山东 青岛: 中国石油大学, 2018.
LI Wan-li. Research on the diffusion characteristics of natural gas leakage under complex terrain based on Gaussian model[D]. Shandong Qingdao: China University of Petroleum, 2018.
- [18] 郭士康, 沈家辉. 高压油管的压力控制[J]. *甘肃科技纵横*, 2020, 49(9): 26–29.
GUO Shi-kang, SHEN Jia-hui. Pressure control of high pressure oil pipe[J]. *Gansu Science and Technology*, 2020, 49 (9): 26–29.
- [19] 李建山. 基于高斯烟羽模型的巷道内天然气井泄漏扩散研究[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2020, 40(8): 185–187, 190.
LI Jian-shan. Study on the diffusion of natural gas well leakage in roadway based on Gaussian plume model[J]. *China Petroleum and Chemical Standards and Quality*, 2020, 40 (8): 185–187, 190.

责任编辑:田 静