



文章栏目: 大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202101099

中图分类号 X51

文献标识码 A

许雪, 陈风, 黄维秋, 等. 基于风洞平台实验的大型罐区溢油事故后的油气扩散模拟[J]. 环境工程学报, 2021, 15(12): 3946-3956.

XU Xue, CHEN Feng, HUANG Weiqiu, et al. Numerical simulation of oil vapor diffusion after oil spill accident in large-scale tank farm based on wind tunnel platform[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(12): 3946-3956.

基于风洞平台实验的大型罐区溢油事故后的油气扩散模拟

许雪¹, 陈风^{1,2}, 黄维秋^{1,✉}, 张高^{1,2}, 娄井杰³, 鄢永兵³, 刘海², 孙媛¹

1. 常州大学, 江苏省油气储运技术重点实验室, 常州 213164

2. 常州一炅环保科技有限公司, 常州 213164

3. 天津中德工程设计有限公司, 天津 300170

第一作者: 许雪(1997—), 女, 硕士研究生。研究方向: 油气回收基础理论与应用。E-mail: 2954314373@qq.com

✉通信作者: 黄维秋(1965—), 男, 博士, 教授。研究方向: 油气回收基础理论及其应用。E-mail: hwq213@cczu.edu.cn

摘要 通过研究江苏省境内某实体罐区发生溢油事故后油气蒸发的扩散规律, 掌握罐区空气浓度的变化, 以达到保障罐区环保与安全的目的。基于风洞平台实验, 测定油气蒸发速率并通过实验风场数据验证数值模型的准确性, 建立与实际油库 1:1 的大型罐区模型, 使用 UDF 编译环境风方程导入。通过 CFD 数值模拟, 重点分析了罐区发生溢油事故后油气扩散规律、储罐间的油气积聚现象、风速对油气扩散及油气质量分数的影响。结果表明: 在风速影响下, 罐间会形成涡流, 导致油气的积聚, 形成危险区域; 防火堤对油气扩散存在阻滞作用, 而背风侧会使油气聚集; 风速越小, 油气扩散越慢, 油气质量分数越高; 风速越大, 油品的蒸发速率越大, 油气扩散越快, 油气质量分数越小。本研究成果可为罐区设计、油库运行及安全环保管理提供参考。

关键词 大型罐区; 泄漏扩散; 风洞; 油气质量分数; 数值模拟

近年来, 我国炼化产业不断发展, 油品周转量稳步提升, 储罐的使用也更频繁。在储罐生产作业中, 设备工艺技术的限制及人为的疏忽均会造成溢油事故^[1]。溢出油品在挥发扩散后遇火源极易产生火灾, 甚至爆炸^[2-3]。2005 年, 英国第五大油库邦斯菲尔德(Buncefield)油库的 912 罐在接收汽油时溢流, 油气迅速扩散并造成多次爆炸^[4-5]。2009 年, 波多黎加勒比石油公司一座储量 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的储罐发生溢流, 油气在扩散时遇到火源发生爆炸^[6-7]。此外, 油品汽化后会形成挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)^[8], 而 VOCs 的控制与治理是环境污染防治与管理中的重要内容^[9]。2020 年, 生态环境部与国家市场监督管理总局联合颁布的《储油库大气污染物排放标准 GB 20950-2020》中规定企业边界排放限值应小于 $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ (非甲烷总烃)^[10]。2020 年 10 月, 生态环境部与国家发展和改革委员会提出, 2021 年 VOCs 的治理重心将继续以石油化工行业为主^[11]。因此, 有关罐区油气扩散规律的研究对储油区大气污染控制及相关企业的环保与安全具有重要意义。

计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)是数值数学和计算机科学相结合的学科,

收稿日期: 2021-01-17; 录用日期: 2021-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574044); 江苏省科技支撑项目(BE2018065)

已发展为重要的研究手段。相对于实验研究，该研究手段具有成本低和耗时短等优点^[12-15]。WANG 等^[16]采用 CFD 方法评估了分隔距离对储罐场中气体扩散和蒸气云爆炸的影响。SUN 等^[17]借助大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 模型模拟了强风天气下储罐密封圈的风压变化及气体扩散情况。刘瑞等^[18]结合 CFD 方法和 ANSYS Fluent 仿真软件求解了覆土油罐泄漏后的油气扩散轨迹。然而，数值模拟的结果通常具有不确定性，必要时需开展可信度的验证^[19]。风洞实验因具有优越的可控性与稳定性，被广泛应用于气体流动的研究^[20-23]。ZHANG 等^[24]借助风洞平台搭建内浮顶罐缩比模型研究了正己烷蒸气的扩散规律。徐川等^[25]和辛保泉等^[26]建立风洞模型对天然气扩散特征进行了研究。目前，关于油气泄漏的研究主要可分为 3 个方面：1) 油气泄漏扩散规律的研究；2) 油气爆炸的数值模拟；3) 城市 VOCs 溯源系统的研发。

在储罐油气泄漏扩散规律方面的研究主要集中在单罐或多罐^[27-29]形式的扩散研究，而对于大型罐区的油气扩散规律的研究较少。基于此，拟通过风洞实验平台与 CFD 数值模拟相结合，以获得溢油事故后大型罐区内油气泄漏扩散规律，为罐区设计、油库运行管理及城市 VOCs 溯源系统的研发提供参考。

1 风洞实验与数值模拟验证

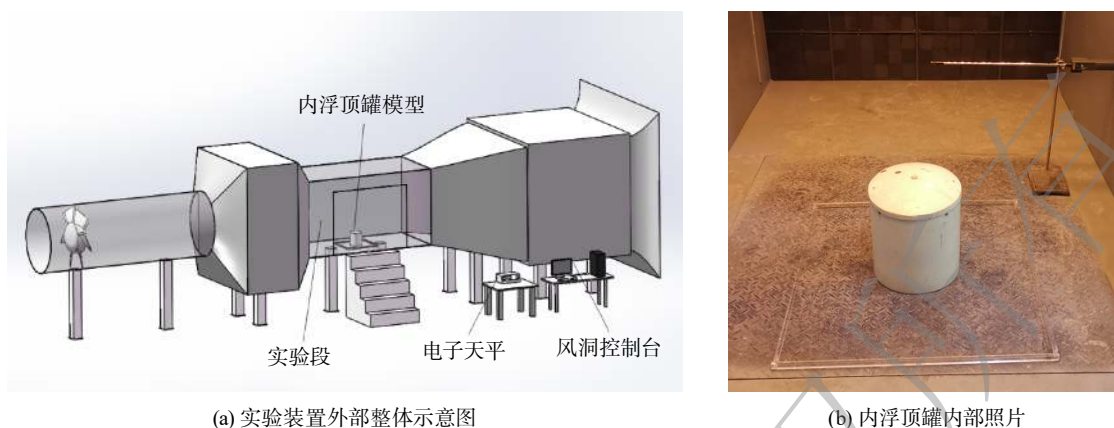
1.1 风洞实验测试方法

搭建的风洞实验平台主要设备为直流式风洞 (型号：DFWT-10)。该风洞由集气段、稳定段、收缩段、实验段、第 1 扩散段、动力段及第 2 扩散段组成。实验段规格：长、宽、高分别为 3.0、1.5、1.5 m，风速调节范围 0.5~10(20) m·s⁻¹，各风速点控制精度优于±0.3%FS；WT-30000-1B 电子天平，量程 0.000 0~30.000 0 kg，精度为 0.000 1 kg；Fluke 923 风速仪，风速量程为 0.20~10(20) m·s⁻¹。

数值模拟中需要设定物质蒸发扩散的速率。为保证数值模拟的准确性，需要测定油品的挥发速率。实验中主要测定风速对油品蒸发速率的影响，实验油品为 92#汽油，风洞实验中温度保持恒定。由于汽油组分复杂，且在溢油过程中会不断有新油流入，所以会有轻组分不断挥发出来，取固定敞口容器装满油品，保证油品与空气充分接触，其中敞口容器直径尺寸为 28 cm，高为 17 cm，使用电子天平分别测量 2 m·s⁻¹ 与 4 m·s⁻¹ 风速下 92#汽油在 30 min 内的质量变化。每隔 5 min 记录 1 次质量，共测 5 组，取其平均值。测得汽油的蒸发速率如下：风速 2 m·s⁻¹ 时，蒸发速率为 0.004 1 kg·(m²·s)⁻¹；风速 4 m·s⁻¹ 时，蒸发速率为 0.005 5 kg·(m²·s)⁻¹。由此结果可知，油品的蒸发损耗速率与风速有关，风速越大，蒸发损耗速度越快。

为保证风洞实验的准确性，根据设计规范 HG 21 502.2-1992《钢制立式圆筒形内浮顶储罐系列》、GB 50074-2014《石油库设计规范》，按照 65:1 的比例建立 3 000 m³ 内浮顶罐与防火堤模型 (防火堤为正方形，尺寸：长、高、宽分别为 47、1.5、0.6 m)。其中，储罐内径 $D=0.260$ m，罐壁高 $H=0.245$ m，防火堤四边内长 $L=0.724$ m，防火堤高 $h=0.023$ m、宽 $d=0.010$ m。风洞模型与原型应满足雷诺数 (Re) 相等，但将风速扩大 65 倍显然不太现实。为此，人们提出 Re 无关性原则，即当 Re 大于某个数值之后，流动结构不再发生变化，该数值称为临界 Re ^[30]。风洞实验中的临界 $Re=22\ 000$ ，储罐直径 D 为特征长度，流场入口最小 $Re=37\ 500$ ，超过临界 Re ，可认为原型与模型相似。

图 1 为风洞实验图。将内浮顶罐与防火堤模型放置在风洞实验段中，使用风速仪在下风 $2L$ 处设置 3 条长度为 $1.5H$ 的直线检测模型后方流场变化，结果如图 2 所示。其中，LINE1 垂直于地面，LINE2、LINE3 平行于地面且离地面距离分别为 $0.75H$ 和 $1.5H$ 。使用风洞提供稳定风速，风速仪测量在 LINE1、LINE2 与 LINE3 这 3 条直线上不同点位的风速值。



(a) 实验装置外部整体示意图

(b) 内浮顶罐内部照片

图1 风洞实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the wind tunnel platform

1.2 数值模拟方法

1.2.1 控制方程和湍流模型

计算流体力学的原理要求获得准确的数值模拟结果, 需要选取正确的流动控制方程。流动基本控制方程通常包括质量守恒方程、动量守恒方程与能量守恒方程。实际情况下风速会随高度发生变化, 因此还需要编译环境风UDF导入Fluent。

1) 梯度风方程。实际情况下, 近地面处的风速随高度变化且与地面粗糙度有很大关系, 数值模拟时需将梯度风编译UDF导入Fluent当中, 表达式见式(1)。

$$W = W_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^n \quad (1)$$

式中: W 为 z 高度处的风速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; W_1 为 z_1 高度处的风速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; n 为风速稳定度参数, 本研究的目标位于城市区域且罐区中储罐等建筑排列密集, n 取值为 0.25。

2) 基本控制方程。油气蒸发扩散的过程需遵循质量守恒方程、动量方程与能量方程, 控制方程的通用形式见式(2)。

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S \quad (2)$$

式中: ρ 为气体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; u 为速度矢量; Φ 为通用变量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项。

3) 湍流方程。油气扩散受到风速影响较大, 流场内流体一般处于湍流状态, 可实现 $k-\varepsilon$ 模型与标准 $k-\varepsilon$ 模型都适用于湍流状态下的流动, 但可实现 $k-\varepsilon$ 模型能更好地表现流场内的气流扰动, 更准确地展现流场内浓度分布, 因此选用可实现 $k-\varepsilon$ 模型, 方程式为式(3)。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \\ C_1 &= \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \end{aligned} \quad (3)$$

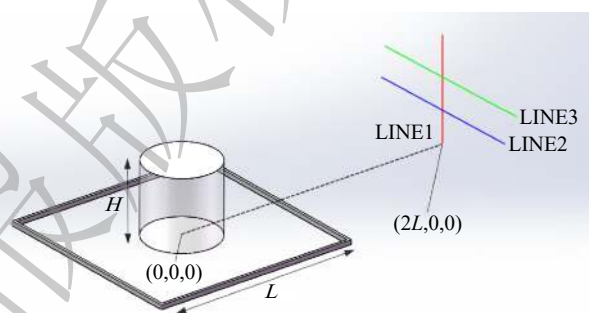


图2 风洞实验各测点分布图

Fig. 2 Distribution of the sampling points in the wind tunnel platform

式中： ρ 为气体的密度， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； x_j 为 j 方向传输距离， m ； u_j 为 j 方向速度， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； t 为时间， s ； K 为湍流动能， $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ ； ε 为耗散率， $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$ ； μ 为油气的动力黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； μ_t 为湍流黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； ν 为运动黏度， $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ； P_k 为由层流速度梯度而产生的湍流动能， $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ ， G_k 是由平均速度梯度引起的湍流动能， $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ ； η 为有效因子； G_b 为由浮力而产生的湍流动能， $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ ； Y_M 为在可压缩湍流中过渡扩散产生的波动， $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ ； C_1 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 C_2 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数； σ_k 和 σ_ε 为 k 方程和 ε 方程对应的普朗德数； S 、 S_{ij} 、 S_k 和 S_ε 为用户定义的源项。

1.2.2 几何模型的构建

内浮顶罐发生溢油冒罐现象，大量油品会从罐中溢出流淌至地面，油气从地面油品液池不断蒸发扩散。油品从罐中下流过程视为气液的饱和平衡状态，即忽略下流过程的闪蒸。数值计算中，为了保证验证计算准确性，模型尺寸与风洞实验尺寸一致，三维计算域满足不大于7%的阻塞率。计算域如图3所示(长、宽、高分别为 $9L$ 、 $5L$ 、 $4H$)，LINE1、LINE2、LINE3为数据提取线。由于结构网格的质量较好且数据结构简单，非结构网格能适应各种复杂的模型，将两者结合采用ICEM CFD软件划分三维混合网格，网格如图4所示。网格节点对齐完整，ICEM CFD中Quality方式检查网格质量为0.31(一般0.3以上属于高质量网格)，Fluent中设置求解器类型为“Pressure-Based”，使用非稳态求解，流场入口边界设置为速度入口边界条件，梯度风按式(1)编译UDF导入，风速沿 x 轴方向进入，流场出口边界设置为压力出口边界条件，网格交界面设置为内部边界，油气释放扩散源设置为质量流率边界条件，质量流率大小为实验测定，其他边界均设置为绝热固壁边界。

1.3 实验验证

为确保后续研究中大型罐区油气扩散的准确性，对小罐的数值模拟结果进行实验验证，将不同风速条件下实验数据与数值模拟值进行比较。图5和图6分别为风速为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 与 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下的各测点风速的数值模拟值与实验值。由图5和图6可知，尽管由于实验仪器与实验条件的限制，实验值与数值模拟值有一些差距，但整体偏差率保持在7%以内，处于正常误差范围，且两者的变化趋势大体一致。这表明建立的数值模型是准确可行的。

2 大型罐区油气扩散数值模拟

2.1 模型与边界条件

以江苏省境内一实体油库为研究对象，进行了实地考察。图7为实地油库周边地形图。因油库左侧为平坦道路开阔地形，对油气扩散

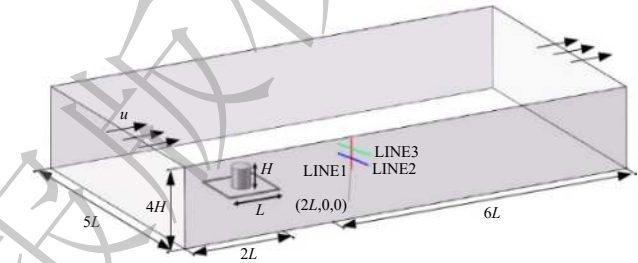
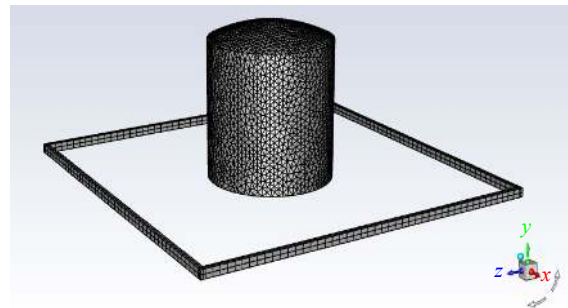
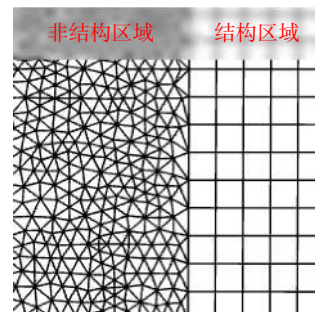


图3 几何模型与外部计算域示意图

Fig. 3 Diagram of geometric model and external computational domain



(a) 内浮顶罐网格划分



(b) 混合网格节点连接

图4 数值模型网格与混合网格节点连接图

Fig. 4 Grid of numerical model and node connection of hybrid grid

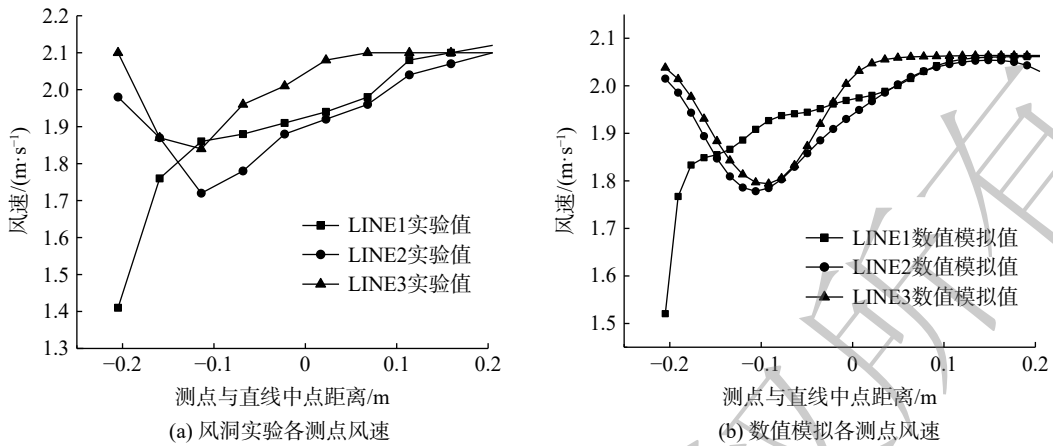


图5 风速 $2 m \cdot s^{-1}$ 各测点风速数值模拟值与实验值

Fig. 5 Numerical simulation and experimental values at each sampling point with wind speed of $2 m \cdot s^{-1}$

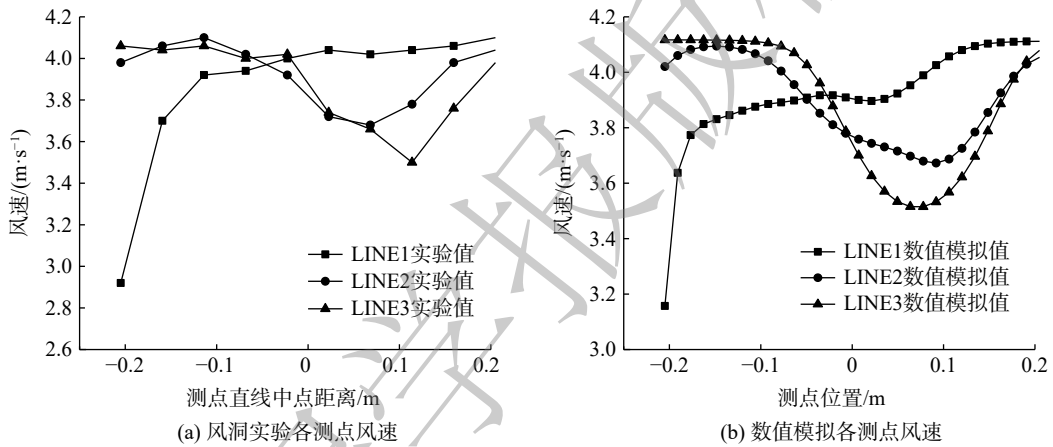


图6 风速 $4 m \cdot s^{-1}$ 各测点风速数值模拟值与实验值

Fig. 6 Numerical simulation and experimental values at each sampling point with wind speed of $4 m \cdot s^{-1}$

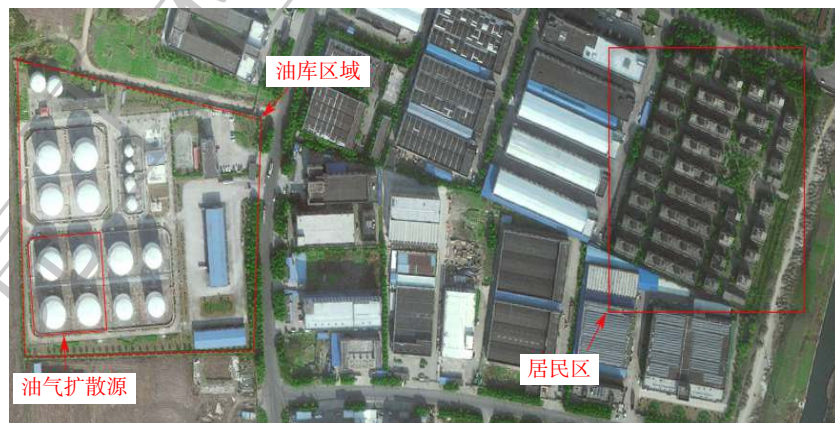
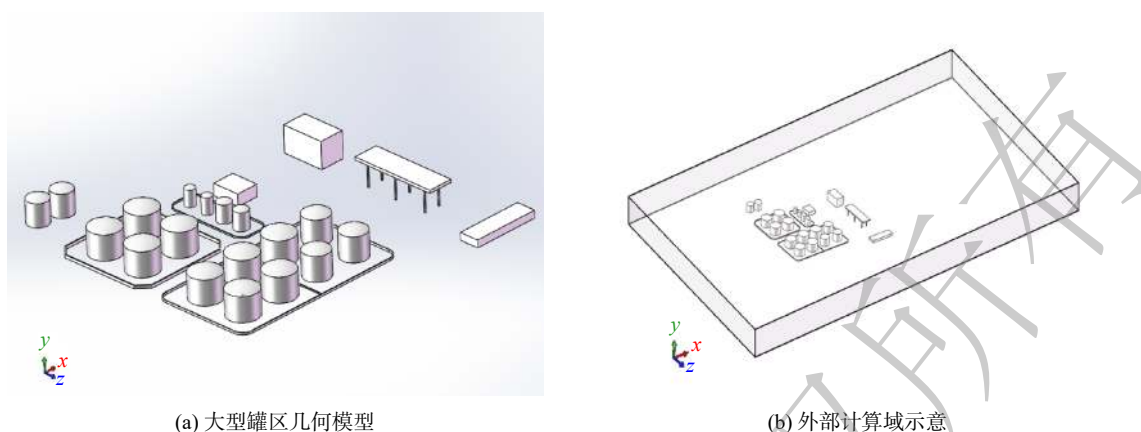


图7 实地油库周边地形图

Fig. 7 Satellite map of the field oil depot and the surrounding areas

行为影响较小，而油库储罐东南侧的建筑分布密集，因此本次模拟主要考虑西南风向。油库右侧为建筑密集区。本研究聚焦罐区内的油气扩散规律，为便于数值模拟的进行，则忽略油库区域外的建筑，建立与实地油库尺寸1:1的大型罐区三维几何模型图(见图8(a))。图8(b)为大型罐区的外部计算域示意图，对罐区内的建筑进行编号，如图9所示。其中，D-01、D-02、D-03、D-04、D-



(a) 大型罐区几何模型

(b) 外部计算域示意

图 8 罐区几何模型与外部计算域示意图

Fig. 8 Geometric model of tank farm and schematic diagram of external computational domain

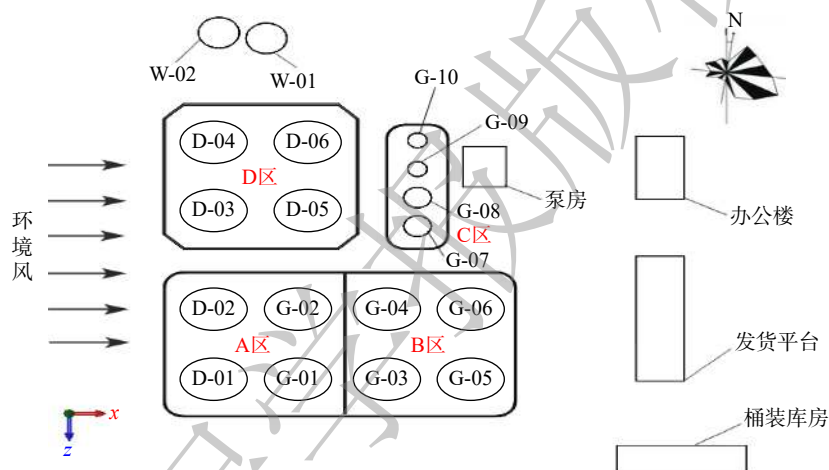


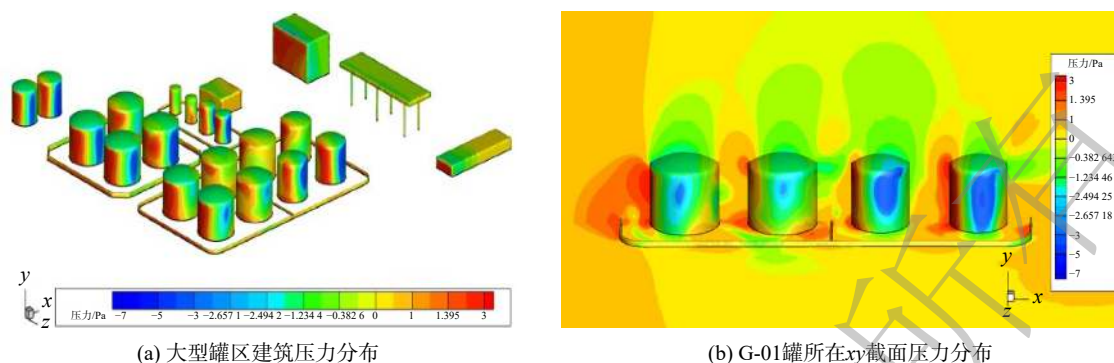
图 9 罐区建筑编号示意图

Fig. 9 Building number of the tank farm

05、D-06 为 $8\ 000\ \text{m}^3$ 柴油储罐；G-01、G-02、G-04 为 $8\ 000\ \text{m}^3$ 汽油储罐；G-03、G-05、G-06 为 $5\ 000\ \text{m}^3$ 汽油储罐；G-07、G-08 为 $1\ 000\ \text{m}^3$ 汽油储罐；G-09、G-10 为 $500\ \text{m}^3$ 汽油储罐；W-01、W-02 为消防水罐。罐区内储罐皆为内浮顶罐，将罐油库分为 A、B、C、D 4 个罐区，罐区之间为消防通道。假设 A 区汽油储罐发生溢油泄漏事故，油品溢满 A 区，汽油溢出至地面过程发生的闪蒸忽略不计，油气持续从 A 区防火堤内蒸发扩散出来，环境风采用 UDF 导入，从左侧沿 x 轴方向进入。

2.2 风场分布

环境风对于罐区内气流流动影响很大，图 10(a) 为风速 $2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时大型罐区建筑的压力云图。由图 10(a) 可知，环境风从左侧沿 x 轴正方向进入罐区，气流撞击前排储罐与防火堤，储罐以及防火堤的迎风侧压力会急剧上升，直接达到该风速下的最大压力，在罐壁形成大面积的红色区域；后排储罐由于前排储罐阻挡了部分气流，迎风侧的红色区域部分会比前排储罐小。由于储罐上方压强较小，在压差的牵引下，罐顶上方的气流速度会高于相同高度的其他区域，形成负压。部分气流在撞击储罐后，加速沿储罐两侧向后方流动，在储罐罐壁形成大面积的蓝色负压区。取 G-01 罐所在 xy 截面，得到该平面的压力云图 (见图 10(b))。由图 10(b) 可知，前排储罐背风侧与后排储罐迎风侧之间都存在明显的负压和高压区域，压强大的气流会流向压强小的区域，在储罐之间形成涡流，油气会在此处聚集，形成危险区域。



(a) 大型罐区建筑压力分布

(b) G-01罐所在xy截面压力分布

图 10 罐区压力分布云图 (风速 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)Fig. 10 Cloud map of the distribution of the wind pressure in the tank farm (wind speed: $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

图 11 为不同风速下大型罐区内流线图。由于油气扩散源在 A 区, 因此, 主要分析从 A 区经过的气流轨迹。由图 11(a) 可知, 当环境风从左侧进入罐区时, 由于 A 区防火堤的阻碍作用, 部分气流在防火堤背风侧形成沿防火堤分布的小漩涡, 部分气流直接越过防火堤到达储罐群, 在储罐后方形成大小不一的涡流。当风速为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 由于风速变大, G-01 罐前方漩涡明显变大, 气流在经过漩涡后汇合形成一束强气流并流向后方储罐 (见图 11(b))。值得注意的是, 经过 A 区的气流由于储罐的阻挡, 一部分经过 C 区储罐流向办公楼, 由于“卡门涡街”效应, 风速 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时办公楼背风侧形成了镜像分布的 2 个漩涡; 当风速增大至 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 2 个漩涡汇合成 1 个, 油气会在此处积聚, 形成潜在危险区域。图 12 为不同风速下大型罐区 xz 截面的风速云图。由图 12 可知, 在储罐、防火堤以及办公楼等建筑后方, 都有速度较小的蓝色区域。这是建筑后方的涡流导致, 风速云图整体符合上述风场规律。

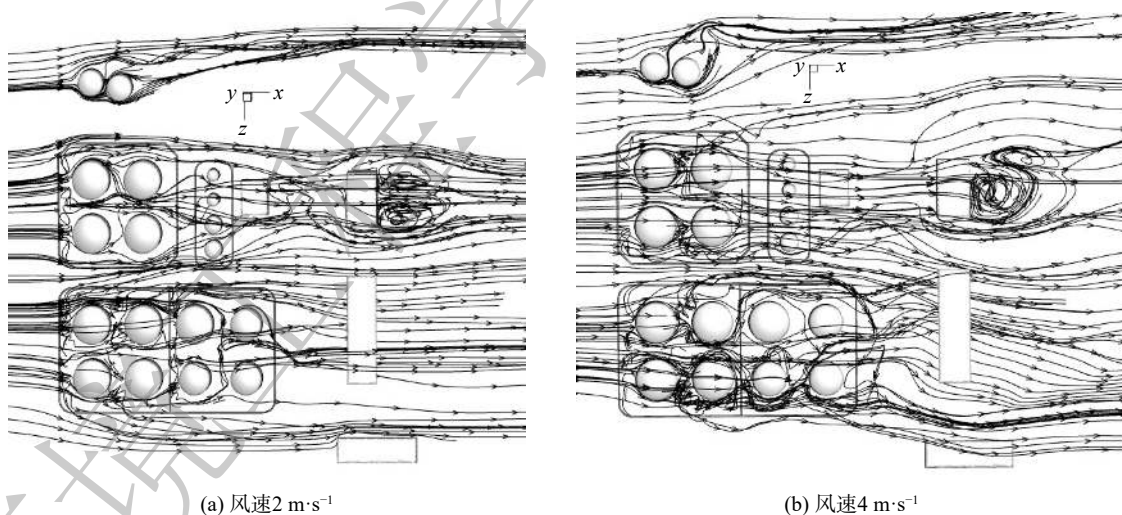
(a) 风速 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (b) 风速 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

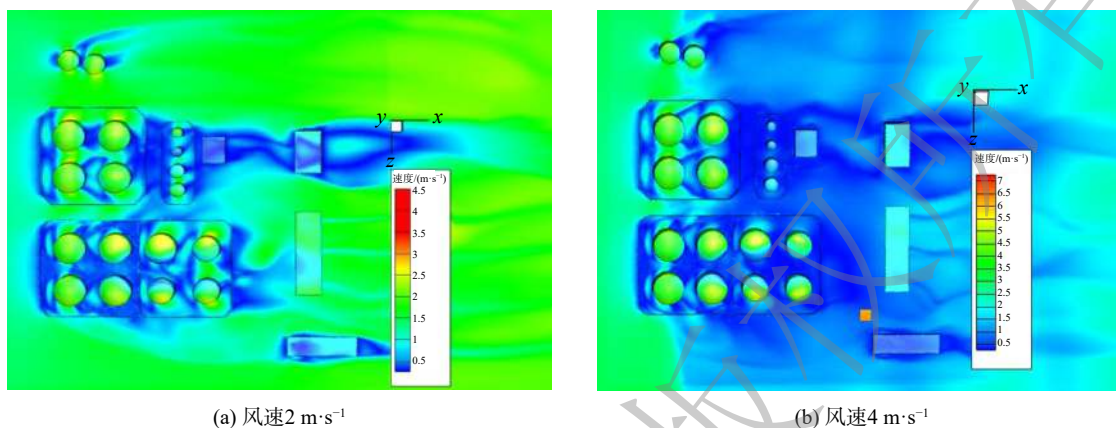
图 11 不同风速下大型罐区内气流流动轨迹

Fig. 11 Air flow trajectory in large-scale tank farm at different wind speeds

2.3 油气扩散分布规律

在实际情况下, 大部分天气状况都不是无风状态, 风速对于油气的蒸发扩散有一定的影响。分别取 G-01 与 G-02 罐的 xy 截面, 得到该截面 15 min 的油气质量分数分布云图。由图 13 可知, 由于重力和涡流的作用, 罐间与防火堤背风侧都积聚了一定量油气。其中, G-01 与 G-03、G-02 与 G-04 之间存在隔堤, 油气在此处聚集量最大, 油气质量分数为 $0.04 \sim 0.06$ 。而汽油的爆炸极限体积分数为 $1.4\% \sim 7.6\%$, 换算成质量分数为 $0.053 \sim 0.245$, 说明这几处油气质量分数达到汽油爆炸极限范

围。G-03、G-05、G-06 为 5 000 m³ 内浮顶罐，G-01、G-04 为 8 000 m³ 内浮顶罐，后者罐高大于前者。气流在经过 G-01 罐顶时，会沿罐顶弧形结构向下运动，“挟卷”起 G-01 与 G-03 罐间聚积的油气，使 G-03 与 G-05 罐顶上方油气质量分数较高。同理，G-06 上方的油气质量分数也高于同等高度的其他区域。

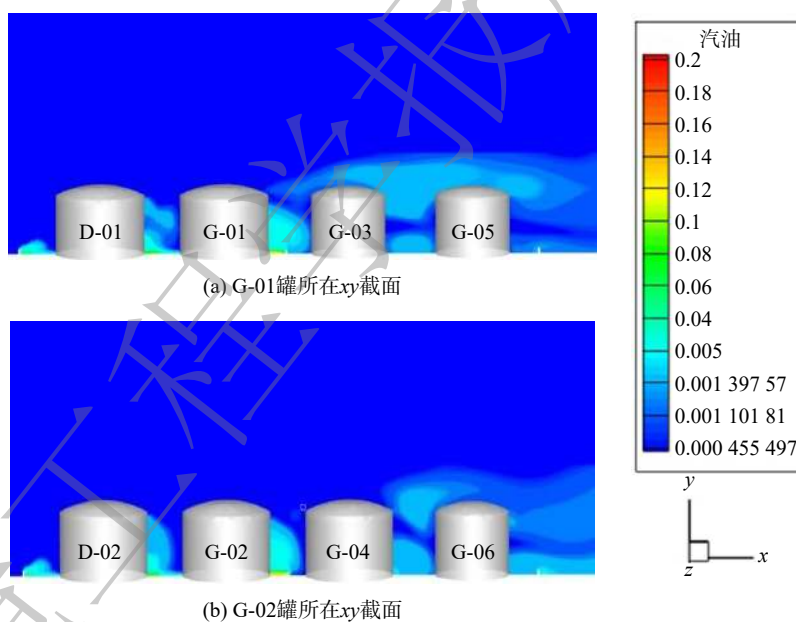


(a) 风速 2 m·s⁻¹

(b) 风速 4 m·s⁻¹

图 12 不同风速下大型罐区 xz 截面风速云图

Fig. 12 Speed distribution of xz plane of large-scale tank farm at different wind speeds



(a) G-01 罐所在 xy 截面

(b) G-02 罐所在 xy 截面

注：t=15 min，风速为 2 m·s⁻¹。

图 13 罐区 xy 截面油气质量分数分布云图

Fig. 13 Cloud map of oil vapor concentration distribution in tank farm on the xy plane

图 14 和图 15 为不同时间下大型罐区 xz 截面近地面 1 m 高度处油气质量分数分布云图。当罐区内发生溢油事故，油气从 A 区防火堤内不断蒸发扩散。由图 14(a) 可知，在 5 min 时，风速 2 m·s⁻¹ 时的油气最远已扩散至发货平台，在此区域工作的人员及车辆需要及时回避。由于储罐的阻滞作用，油气会向两侧发散，受两侧压强的牵引，向桶装库房以及 C 区储罐扩散。同时，由于 C 区一侧湍流强度较大，油气已经蔓延至 C 区内。当风速为 4 m·s⁻¹ 时，如图 14(b) 所示，C 区内油气会被挟卷至远处，而库房一侧由于流速的增大和 B 区储罐的影响，会被油气迅速蔓延。当风速为 2 m·s⁻¹ 与 4 m·s⁻¹ 时，A 区的油气质量分数最高分别达到了 0.125 和 0.085，A 区与 D 区之间的消防通道也

被高浓度的油气覆盖，远超汽油的爆炸下限。因此，在事故后救援车辆应从溢油地点上风侧驶来，以避免汽车造成火星引发爆炸事故。

由图15可知，A区内油品不断蒸发，油气经过15 min的扩散，无论风速 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 还是 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，C区与D区内都已充满油气，罐区外办公楼、发货平台以及桶装库房都被油气覆盖。但当风速 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，A区内油气质量分数为 $0.05\sim 0.08$ ，较风速 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时有所下降。这是因为风会加速空气对油气的稀释，所以风速越小，罐区内油气质量分数越大，风速越大，油气扩散速度越快。

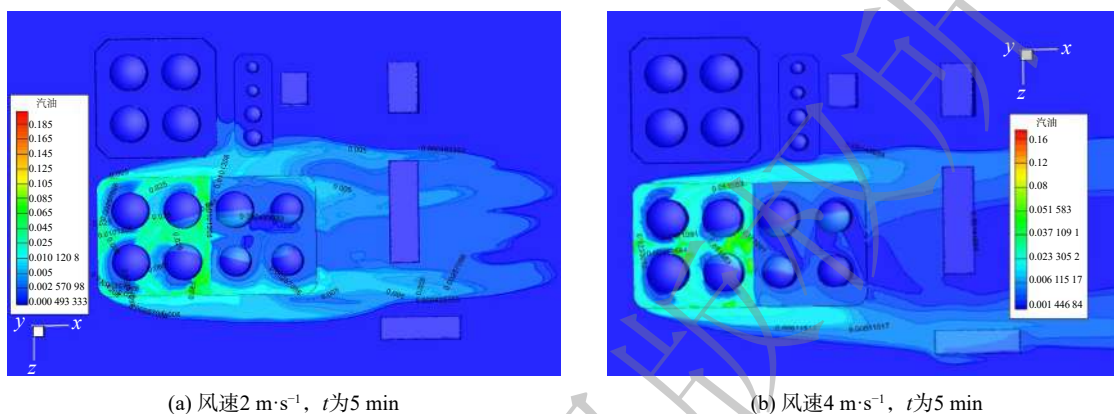


图14 大型罐区xz截面油气质量分数分布云图

Fig. 14 Cloud map of oil vapor concentration distribution in large-scale tank farm on the xz plane

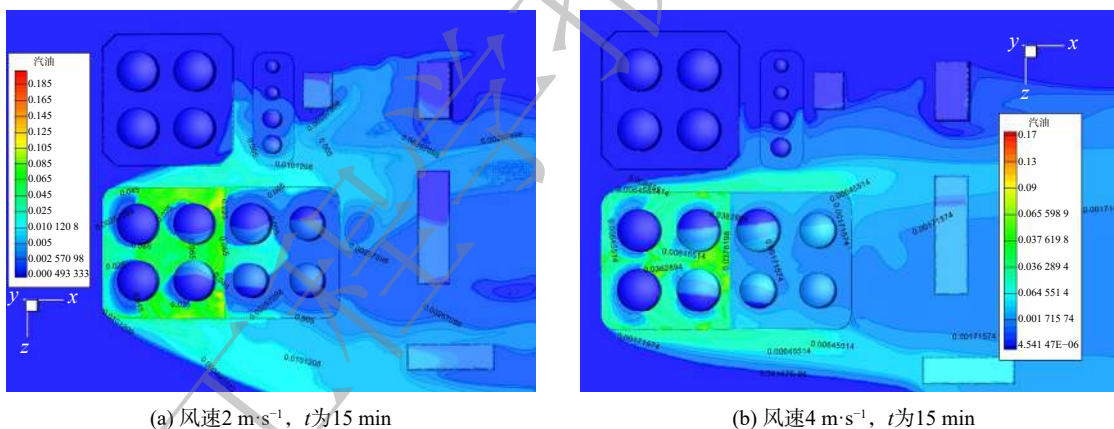


图15 不同风速下大型罐区xz截面油气质量分数分布云图

Fig. 15 Cloud map of oil vapor concentration distribution in large-scale tank farm on the xz plane

3 结论

1) 在风速的影响下，罐区内储罐迎风侧的压力大于背风侧的压力，在罐间存在大小不一的回流区域，在重力的影响下，整体趋势向下运动，造成罐间的油气聚集。因此，应在储罐间设置油气质量分数报警仪，预防罐区内的油气泄漏扩散等事故。

2) 当储罐高度同等时，储罐间油气主要积聚在前排储罐背风侧下方，当前排储罐高于后排储罐时，气流会挟卷罐间油气至后排储罐罐顶，使其油气质量分数较高于同等高度区域。

3) 罐区内一般会存在防火堤。若在防火堤上风处发生油气泄漏，防火堤对于油气的扩散有一定的阻滞作用，但此区域的油气质量分数也会相应增大，而防火堤的背风侧会形成沿防火堤分布的小涡流，造成油气的堆积。

4) 不同风速下，风速小时油气扩散较慢；油气质量分数越高，风速越大油品的蒸发速率越

大, 油气扩散越快。在发生溢油事故后, 在风速影响下油气会短时间内迅速扩散至附近消防通道, 救援车辆应从事故地点上风侧驶入, 以避免因车辆的火星造成爆炸事故。

参考文献

- [1] CIRIMELLO P G, OTEGUI J L, RAMAJO D, et al. A major leak in a crude oil tank: Predictable and unexpected root causes[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 100: 456-469.
- [2] SHARMA R K. A violent, episodic vapour cloud explosion assessment: Deflagration-to-detonation transition[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 65: 104086.
- [3] ZHANG L, MA H, SHEN Z, et al. Influence of pressure and temperature on explosion characteristics of n-hexane/air mixtures[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 102: 52-60.
- [4] ATKINSON G, COLDRICK S, GANT S, et al. Flammable vapor cloud generation from overfilling tanks: Learning the lessons from Buncefield[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 35: 329-338.
- [5] ATKINSON G, COWPE E, HALLIDAY J, et al. A review of very large vapour cloud explosions: Cloud formation and explosion severity[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 48: 367-375.
- [6] ORAN E S, CHAMBERLAIN G, PEKALSKI A. Mechanisms and occurrence of detonations in vapor cloud explosions[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2020, 77: 100804.
- [7] CHAMBERLAIN G, ORAN E, PEKALSKI A. Detonations in industrial vapour cloud explosions[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2019, 62: 103918.
- [8] 黄维秋. 油气回收基础理论及其应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2011.
- [9] 吴悦, 曾向东, 金海花, 等. 中国石油化工废气处理技术进展[J]. *石油学报(石油加工)*, 2000(6): 79-84.
- [10] 中华人民共和国生态环境部. 储油库大气污染物排放标准: GB 20950-2020[S]. 北京: 中国环境出版社, 2020.
- [11] 中华人民共和国生态环境部. 关于深入推进重点行业清洁生产审核工作的通知[EB/OL]. [2021-01-10]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk05/202010/t20201020_803925.html, 2020-10-16.
- [12] SHEN R, JIAO Z, PARKER T, et al. Recent application of computational fluid dynamics (CFD) in process safety and loss prevention: A review[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 67: 104252.
- [13] 陈金金, 潘亚东, 郭翔宇. CFD软件在油气储运工程领域的应用研究[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2019, 39(1): 144-145.
- [14] 王福君. 计算流体力学分析: CFD软件原理与应用[J]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 7-12.
- [15] 阎超, 屈峰, 赵雅甜, 等. 航空航天CFD物理模型和计算方法的述评与挑战[J]. *空气动力学学报*, 2020, 38(5): 829-857.
- [16] WANG Q H, SUN Y L, SHU C M, et al. Effect of separation distance on gas dispersion and vapor cloud explosion in a storage tank farm determined using computational fluid dynamics[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 68: 104282.
- [17] SUN X, LI W X, HUANG Q Y, et al. Large eddy simulations of wind loads on an external floating-roof tank[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2020, 14(1): 422-435.
- [18] 刘瑞, 王冬, 张培理, 等. 覆土油罐油气泄漏扩散数值模拟[J]. *天然气与石油*, 2020, 38(6): 136-142.
- [19] 陈鑫, 王刚, 叶正寅, 等. CFD不确定度量化方法研究综述[J]. *空气动力学学报*, 2021, 39(4): 1-13.
- [20] HU T, YOSHIE R. Effect of atmospheric stability on air pollutant concentration and its generalization for real and idealized urban block models based on field observation data and wind tunnel experiments[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 207: 104380.
- [21] LIN C, OOKA R, KIKUMOTO H, et al. Wind tunnel experiment on high-buoyancy gas dispersion around isolated cubic building[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 202: 104226.
- [22] SUN D, SHI X, ZHANG Y, et al. Spatiotemporal distribution of traffic emission based on wind tunnel experiment and computational fluid dynamics (CFD) simulation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 282: 124495.
- [23] 崔鹏义, 李卓, 陶文铨. 街道峡谷内污染物扩散的风洞试验与数值分析[J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(12): 2491-2495.
- [24] ZHANG G, HUANG F Y, HUANG W Q, et al. Analysis of influence of floating-deck height on oil-vapor migration and emission of internal floating-roof tank based on numerical simulation and wind-tunnel experiment[J]. *Processes*, 2020, 8(9): 1026.
- [25] 徐川, 李万莉, 刘翠伟, 等. CFD模拟障碍物条件下甲烷扩散的有效性研究[J]. *油气田地面工程*, 2019, 38(S1): 90-93.
- [26] 辛保泉, 喻健良, 党文义, 等. 复杂地形高含硫天然气风洞扩散实验及安全防护距离[J]. *天然气工业*, 2020, 40(11): 149-158.
- [27] HUANG W Q, HUANG F Y, FANG J, et al. A calculation method for the numerical simulation of oil products evaporation and vapor diffusion in an internal floating-roof tank under the unsteady operating state[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 188: 106867.
- [28] 黄维秋, 方洁, 吕成, 等. 内浮顶罐组油气泄漏扩散叠加效应的数值模拟与风洞实验研究[J]. *化工学报*, 2019, 70(11): 4504-4516.
- [29] 刘国梁, 宣捷, 杜可, 等. 重烟羽扩散的风洞模拟实验研究[J]. *安全与环境学报*, 2004, 4(3): 27-32.
- [30] 景海波, 黄维秋, 纪虹, 等. 基于数值模拟技术的油气扩散风洞实验相似准则数研究[J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2020, 32(4): 83-92.

(责任编辑: 靳炜)

Numerical simulation of oil vapor diffusion after oil spill accident in large-scale tank farm based on wind tunnel platform

XU Xue¹, CHEN Feng^{1,2}, HUANG Weiqiu^{1*}, ZHANG Gao^{1,2}, LOU Jingjie³, YAN Yongbing³, LIU Hai², SUN Yuan¹

1. Jiangsu Key Laboratory of Oil&Gas Storage and Transportation Technology, Changzhou University, Changzhou 213164, China

2. Changzhou First Hydrocarbon Environmental Protection SCI-TECH Co. LTD, Changzhou 213164, China

3. Tianjin Zhongde Engineering Design Co. LTD, Tianjin 300170, China

*Corresponding author, E-mail: hwq213@cczu.edu.cn

Abstract Study on the law of oil vapor evaporation and diffusion after oil spill accident in tank farm is of great significance for ensuring the safety and environmental protection of tank farm. Based on the wind tunnel test platform, the evaporation rate of oil vapor was measured, and the accuracy of the numerical model was verified by the experimental wind field data. A large-scale tank farm model was established with a ratio of 1:1 to the actual oil depot, and the environmental wind equation was compiled by UDF to import the numerical simulation. Through CFD numerical simulation, the pattern of oil vapor diffusion after the oil spill accident in tank farm, the oil vapor accumulation between tanks, and the influence of wind speed on the diffusion and concentration of oil vapor, were emphatically analyzed. The results showed that with the influence of wind speed, the vortex between tanks would lead to the accumulation of oil vapor, which was prone to form a dangerous area. The fire dike had a blocking effect on oil vapor diffusion, while the leeward side would cause oil vapor accumulation. The lower the wind speed, the slower the oil vapor diffusion and the higher the oil vapor concentration would be; the higher the wind speed, the greater the evaporation rate of oil and the faster the diffusion of oil vapor would be. The research results are of reference value for tank farm design, oil depot operation and safety and environmental protection management.

Keywords large-scale tank farm; leakage and diffusion; wind tunnel; oil vapor concentration; numerical simulation