

文章编号: 1000-8241(2020)04-0425-09

# 基于风洞平台实验的内浮顶罐油气泄漏扩散数值模拟

黄维秋 陈风 吕成 张高 黄风雨

常州大学石油工程学院

**摘要:** 研究内浮顶罐油气泄漏扩散规律,对于加强环境污染控制、保障罐区安全具有重要意义。建立风洞实验平台,测试小型内浮顶罐风速及浮盘位置对蒸发损耗速率的影响,并考察了风场、浓度场分布规律。基于CFD数值模拟,使用UDF导入环境风,建立了内浮顶罐油气泄漏扩散的数值模型,并通过风洞实验数据验证其模拟的可行性。重点讨论了内浮顶罐外风场及风压分布规律、风速对内浮顶罐油气流场分布及油气扩散浓度的影响。结果表明:浮盘位置越低、风速越大,蒸发速率越快;罐壁的静压力分布规律为迎风侧最大、背风侧居中、罐两侧最小;不同风速下,罐内油气分布整体呈现对称状态;风速越小,油气质量浓度越高,浮盘缝隙处的油气质量浓度最高,并存在安全和环境污染隐患。研究成果对于内浮顶罐设计及运行维护、环保安全管理具有参考价值。(图13,参27)

**关键词:** 内浮顶罐; 油气泄漏; 风洞; 油气质量浓度; 数值模拟

中图分类号: TE85

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.04.010

## Numerical simulation of oil vapor leakage and diffusion from inner floating roof tank based on wind tunnel platform experiment

HUANG Weiqiu, CHEN Feng, LYU Cheng, ZHANG Gao, HUANG Fengyu

School of Petroleum Engineering, Changzhou University

**Abstract:** Study on the law of oil vapor leakage and diffusion in inner floating roof tanks is of great significance for strengthening environmental pollution control and ensuring tank farm safety. The wind tunnel test platform was established to test the effects of wind speed and floating plate position on evaporation loss rate of small inner floating roof tank, and the distribution laws of wind field and concentration field were investigated. Based on CFD numerical simulation, the UDF was used to introduce environmental wind, the numerical model of oil vapor leakage and diffusion from inner floating roof tank was established, and the feasibility of the simulation was verified by wind tunnel experimental data. The distribution law of wind field and wind pressure outside the inner floating roof tank, as well as the influence of wind speed on the flow field distribution and the diffusion concentration of oil vapor in the inner floating roof tank, was emphatically discussed. The results show that the lower the floating plate position and the higher the wind speed, the faster the evaporation rate will be. The static pressure distributed on the tank wall is as follows: highest on windward wall, medium on leeward wall and lowest on the two side walls. Under different wind speeds, the distribution of oil vapor on the tank is symmetrical. The lower the wind speed, the higher the oil vapor mass concentration will be. The oil vapor concentration at the gap between floating plates is the highest, leaving hidden dangers of safety and environmental pollution. The research results are of reference value for the design, operation and maintenance of the inner floating roof tank and environmental protection and safety management. (13 Figures, 27 References)

**Key words:** inner floating roof tank, oil vapor leakage, wind tunnel, mass concentration of oil vapor, numerical simulation

内浮顶罐由于浮盘紧贴油面,大大降低了油品蒸发损耗,且外部拱顶能有效地防止风、砂、雨雪或灰尘的侵入,保证储液的质量,成为储油罐的主要罐型之一<sup>[1]</sup>。然而,由于内浮顶罐浮盘密封不严、年久失修、

腐蚀等原因,油气会从浮盘边圈等缝隙中泄漏,在罐内气体空间积聚而超出爆炸极限上限<sup>[2]</sup>,若遭遇雷击或雷云的静电感应会发生爆炸<sup>[3-6]</sup>。2007年6月29日,镇海炼化一台5 000 m<sup>3</sup>的内浮顶石脑油罐遭雷击,引

起爆炸事故;2018年3月20日,新加坡布星岛码头的  $4 \times 10^4 \text{ m}^3$  内浮顶燃油罐遭雷击引起火灾事故,造成资源浪费和环境污染。油气属于挥发性有机物(VOCs),其密度常大于空气,泄漏扩散到空气中的油气会长时间漂浮在地面,对环境产生直接危害,也是产生光化学烟雾的主要反应物之一<sup>[7-8]</sup>。尽管内浮顶罐油气泄漏比常规拱顶罐要少得多,但随着VOCs排放标准的日益严格和精细化管理,其泄漏所造成的环境污染已引起各国的高度重视,如美国通过清洁空气法案将有毒空气污染物列为重点控制名单<sup>[9]</sup>,中国也制定了一系列标准规范控制油气排放,规定有机液体储罐排放的油气应达到相关污染控制要求。然而,内浮顶罐内部油气泄漏及传质机理尚未成熟,需要进一步研究内浮顶罐油气泄漏扩散规律。

数值模拟广泛应用于气体扩散规律的研究。刘君等<sup>[10]</sup>对加油站中的油气扩散进行模拟,得到加油站在使用油气回收系统前后油气质量浓度的分布情况。Kim等<sup>[11]</sup>基于真实的加氢站三维几何结构,通过实验与CFD模拟结果验证,得到加氢站泄漏后的气体扩散特性。Kountouriotis等<sup>[12]</sup>利用CFD工具,分析了不同成分的汽油在不同影响因素(风速、风向、温度、泄漏位置等)下的油气扩散规律。研究表明,在泄漏扩散源上方,油气的质量浓度远远高于爆炸极限,将扩散源减至50%,气云的尺寸也减少50%。郝庆芳等<sup>[13]</sup>利用ANSYS软件模拟了泄漏孔位置和风速对外浮顶罐油气扩散的影响,结果表明泄漏口位置和风速会对油气泄漏后的积聚位置和扩散范围产生较大影响。在研究气体扩散方面,风洞实验平台具有良好的可控性,可以提供稳定风场<sup>[14-18]</sup>。为此,拟通过风洞平台实验与Fluent数值模拟相结合,获得内浮顶罐的泄漏扩散规律,为内浮顶罐的安全运行,油气排放的污染控制提供必要的理论支持。研究内容不考虑罐内油品粘壁损耗的影响,该影响是间歇性的,需要另行研究。

## 1 油气泄漏研究方法与模型

### 1.1 研究方法

内浮顶罐油气从浮盘缝隙泄漏之后,风速对储罐的流场分布和油气分布有着重要影响。通过风洞实验平台,使用高精度测量仪器,得到小型内浮顶罐正己烷和92#汽油在不同风速下的蒸发损耗速率。同

时,使用ICEM软件建立三维内浮顶罐泄漏模型,通过Fluent软件进行模拟,将得到的结果与风洞实验测得的风速、浓度分布数据进行对比,验证数值模拟的可行性。

### 1.2 控制方程和湍流模型

计算流体动力学可以看作是流动基本方程控制下对流动的数值模拟,因此首先要建立基本控制方程。风沿一定方向吹向内浮顶罐,会造成罐内油品蒸发和油气扩散,需遵守组分运输方程,一般来说,油气在大气中扩散均处于湍流状态,标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和Realizable  $k-\varepsilon$ 湍流模型都适用于湍流充分发展的流动,但Realizable  $k-\varepsilon$ 湍流模型相比于标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型能更好地展现流动分离和旋涡,也比标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型能更准确地展现浓度分布情况<sup>[19]</sup>。因此,选用Realizable  $k-\varepsilon$ 湍流模型进行模拟研究。油气泄漏扩散过程普遍遵守连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程、组分运输方程及湍流方程<sup>[20]</sup>,其表达式分别为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho v_j)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_i v_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_t \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + (\rho - \rho_a)g \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{c_{pv} - c_{pa}}{c_p} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_j \omega)}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D_1 \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial (\rho K)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_j K)}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\alpha_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + \\ &P_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \\ \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_j \varepsilon)}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\alpha_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ &C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} + S_\varepsilon \end{aligned} \right. \quad (5)$$

式中: $\rho$ 为气体的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $t$ 为时间,  $\text{s}$ ;  $x_j$ 为坐标位置,  $\text{m}$ ;  $v_j$ 为 $x_j$ 方向的速度分量,  $\text{m/s}$ ;  $p$ 为绝对压力,  $\text{Pa}$ ;  $\mu_t$ 为流体的动力黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\rho_a$ 为空气的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $g$ 为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $T$ 为流体的温度,  $\text{K}$ ;  $\sigma_c$ 为湍流施密特数,通常取1.0;  $\sigma_T$ 为湍流普朗德数,通常

取 0.9~1.0;  $c_{pv}$ 、 $c_{pa}$ 、 $c_p$  分别为混合气体、空气及泄漏油气的定压比热容,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $\omega$  为质量分数;  $D_1$  为湍流扩散系数,  $m^2/s$ ;  $P_k$  为由于层流速度梯度而产生的湍流动能,  $m^2/s^2$ ;  $G_k$  为平均速度梯度引起的湍流动能,  $m^2/s^2$ ;  $G_b$  为由于浮力而产生的湍流动能,  $m^2/s^2$ ;  $K$  为湍流动能,  $m^2/s^2$ ;  $\varepsilon$  为耗散率,  $m^2/s^3$ ;  $\mu$  为油气的动力黏度,  $Pa \cdot s$ ;  $Y_M$  为在可压缩湍流中过渡扩散产生的波动;  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$  为经验常数;  $\alpha_k$ 、 $\alpha_\varepsilon$  分别为  $k$  方程、 $\varepsilon$  方程对应的普朗德数;  $S_k$ 、 $S_\varepsilon$  为用户自定义的源项。

### 1.3 ICEM 软件建模和网格划分

使用 ANSYS 中自带的 ICEM 软件建模, 为了与风洞实验对应, 根据 HG 21502.2—1992《钢制立式圆筒形内浮顶储罐系列》, 建立 32:1 缩小比的  $1\,000\,m^3$  内浮顶罐模型。经过计算, 所采用的模型尺寸符合风洞实验中模型阻塞率最好不大于 3% 的要求<sup>[21-23]</sup>, 储罐直径 344 mm, 边圈缝隙宽 6 mm, 罐壁高 395 mm, 顶盖高 41 mm。罐壁上边缘均匀分布 4 个宽 17 mm、高 9 mm 的气孔, 浮盘高度为 312 mm。考虑到计算结果的准确性, 计算域选择三维计算, 其尺寸为  $15D \times 10D \times 5H$  (图 1,  $D$  为储罐直径,  $H$  为储罐总高度)。罐模型为实际储罐的简化模型, 整体较为规律, 因此采用 O 形网格进行结构化网格划分, 对罐壁气窗位置和浮盘缝隙区域的网格进行局部加密, 避免计算量过大导致计算缓慢, 网格数量  $176 \times 10^4$  个 (图 2)。

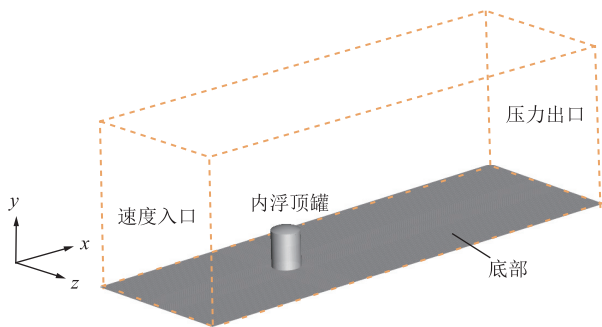


图 1 内浮顶罐油气泄漏扩散计算域模型图

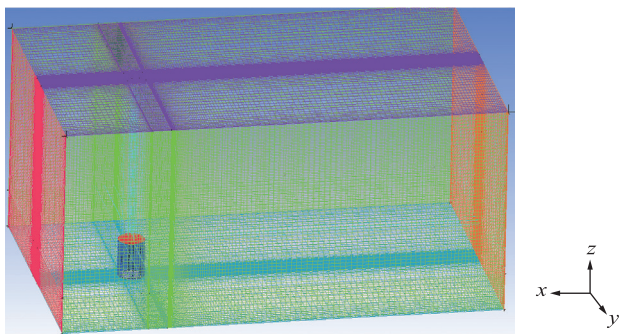


图 2 内浮顶罐油气泄漏扩散计算域网格划分图

考虑到浮盘边圈以及气窗含有尺寸较小的网格, 选用双精度求解器。求解控制方程时压力速度耦合项采用 SIMPLEC 算法, 流场入口边界和出口边界采用速度进口和压力出口边界条件, 浮盘缝隙设置为质量流率边界条件, 质量流率数值为实验测定, 罐壁、浮盘及地面设为无滑移边界条件。沿  $x$  轴方向, 将环境风通过 UDF 导入, 环境温度为  $13\,^{\circ}C$ 。

## 2 风洞平台实验

为了能够得到有效的内浮顶罐油气泄漏规律, 需要对模拟结果进行实验验证。为此, 建立了一套具有后置变频防爆风机调速引流、可调式太阳灯辐射加热的直流式风洞平台 DFWT-10 (图 3), 平台尺寸为  $3\,m \times 1.5\,m \times 1.5\,m$  (长  $\times$  宽  $\times$  高), 风速调节范围为  $0.5 \sim 10\,m/s$ , 自动采集流场内的风压、温度、风速。平台配置了岛津 GC-2010 Plus 气相色谱仪 (FID 检测器)、泰仕 TES-1341 热线风速计、WT-30000-1B 电子天平及热线风速传感器 (Fluke923ID 控制系统) 等各种在线和离线仪器仪表。实验储罐模型与模拟几何模型尺寸一致, 实验时将储罐模型放置于风洞实验段的中心位置。由于汽油的组分较复杂, 主要成分为  $C_4 \sim C_{12}$ , 扩散性质相差不大, 为简化物理模型, 使用单组分的正己烷来代替汽油进行实验, 得到风速为  $2\,m/s$ 、 $4\,m/s$ 、 $6\,m/s$  以及不同浮盘高度 ( $90\,mm$ 、 $130\,mm$ 、 $220\,mm$ 、 $260\,mm$ 、 $312\,mm$ ) 下的正己烷蒸发损耗速率 (图 4a)。美国环保署 (Environmental Protection Agency, EPA) 公布的浮顶罐蒸发损耗公式 (API 内浮顶罐蒸发损耗公式) 中, 未考虑外界风速、浮盘位置对油品蒸发损耗的影响<sup>[24]</sup>。但从图 4a 中可见, 风速越大, 蒸发速率越快, 在风速一定的情况下, 浮盘位置越低, 蒸发速率越快。当然, 这与浮盘的缝隙大小有关, 缝隙小, 泄漏的油气量也小, 外界风和浮盘位置对油品的损耗影响就小, 甚至可以忽略不计。采用相同方法, 用汽油进行实验, 得到汽油的蒸发损耗速率 (图 4b), 可以发现正己烷与汽油的整体变化规律类似。由于正己烷为汽油油气的主要成分, 且物性较温和, 因此使用单组分正己烷代替汽油进行实验和模拟是可行的, 也方便实验测试。

浮盘高度固定为  $312\,mm$ , 对比内浮顶罐浮盘上方的实测风速与模拟风速 (图 5a) 可见, 模拟风速与实测

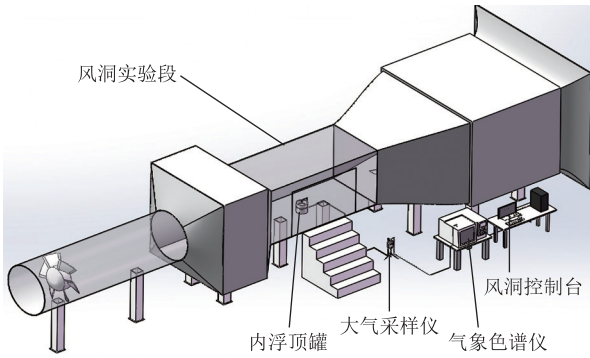
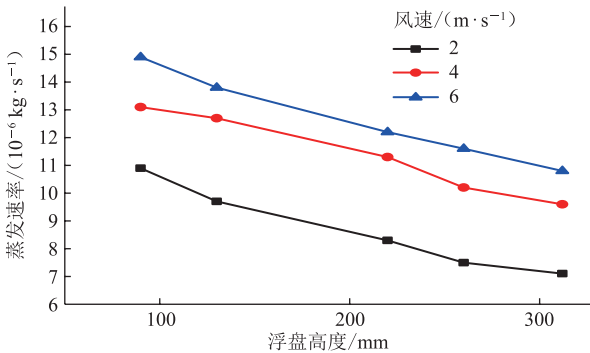
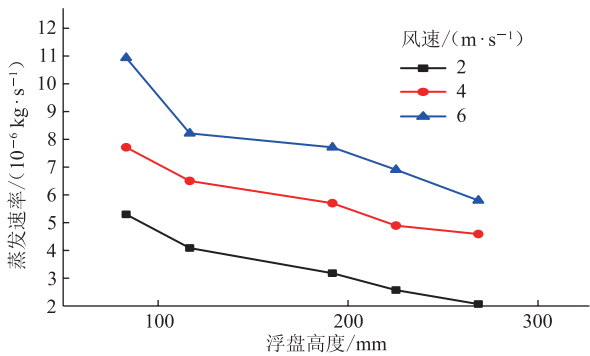


图3 内浮顶罐油气泄漏扩散风洞平台实验示意图



(a) 正己烷



(b) 汽油

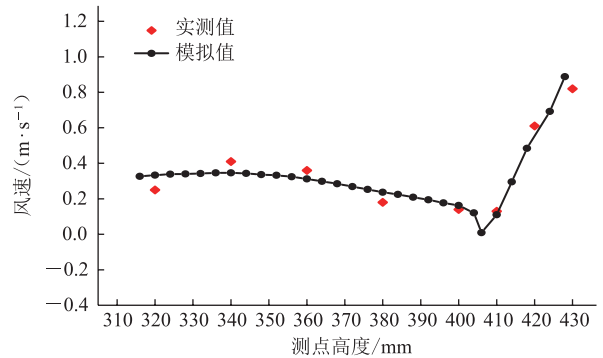
图4 正己烷与汽油在不同风速及浮盘高度下的蒸发损耗速率

风速吻合性较好。对比内浮顶罐浮盘上方正己烷质量浓度的实测值与模拟值(图5b)可见,靠近浮盘处的油气质量浓度较高,随着测点高度增加,油气质量浓度减小,到达最低点后油气质量浓度再次上升,且模拟值与实测值变化趋势一致,证明该模型的构建与数值模拟的参数设置合理,模型可用<sup>[25-27]</sup>。

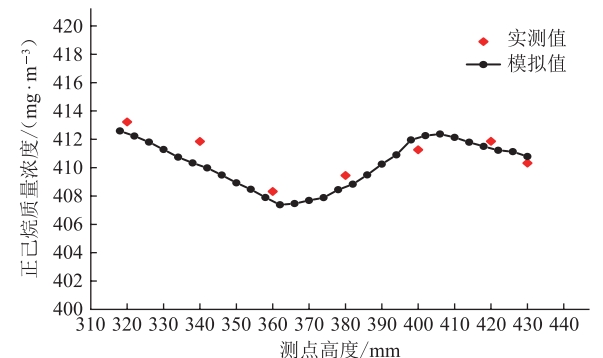
### 3 模拟结果

#### 3.1 风场及风压分布规律

当风速为4 m/s时,由内浮顶罐 $xz$ 截面(浮盘高度)风压云图(图6a)可见,由于左侧迎风侧为速度入口,因此储罐的正方气窗压力大于0,两侧由于流速加

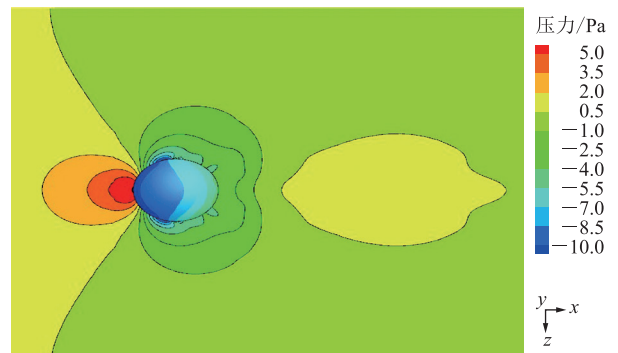


(a) 风速

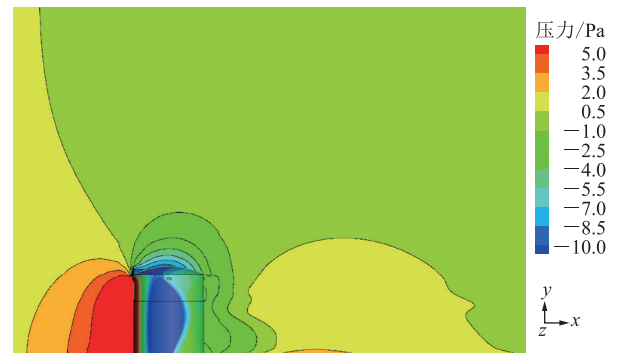


(b) 正己烷质量浓度

图5 内浮顶罐浮盘上方风速和正己烷质量浓度分布模拟值与实测值对比



(a)  $xz$  截面(浮盘高度)



(b)  $xy$  截面

图6 风速为4 m/s时内浮顶罐周围风压云图

快,形成负压区,此时气体从罐内向罐外流出。由该风速下 $xy$ 截面的风压等值云图(图6b)可见,压力的

分布亦会影响到风场的分布。在上风侧,由于受到罐壁的阻挡,压力会急剧上升,在上部罐壁附近的高气压会作用于靠近罐壁上方的气体,使其偏向罐顶上方流动;同时,在上风向罐壁高压与浮盘上方低压的压差作用下,罐顶上方的气体流速高于同等高度其他区域的流速。

当风速为 4 m/s 时,由风速等值云图(图 7)可见,在内浮顶罐的左侧罐壁处,从上至下均有一层浅蓝色区域,这是因为模拟环境风从左侧进入,受到内浮顶罐罐壁的阻碍,风速逐渐减小,风撞击罐壁后产生回流,因此罐壁处的风速接近 0。近地面处,由于地面粗糙度的影响,风速会减小,因此图中出现一层绿色区域。在左侧底部,存在小面积风速为负值的蓝色区域,说明风在地面与罐壁的共同阻碍下形成回流,这部分区域的油气质量浓度会比罐壁左侧其他区域高,应作为平时重点监测区域。在罐壁背风侧,存在大面积的蓝色区域,说明风在储罐右侧有强烈的回流,风速等值线整体向右下方倾斜,油气浓度在这部分区域较高。当风经过内浮顶罐罐顶时,由于罐顶弧形结构的作用,风速

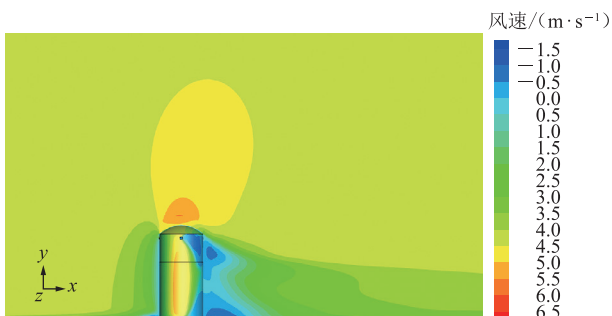


图 7 风速为 4 m/s 时内浮顶罐  $xy$  截面风速云图

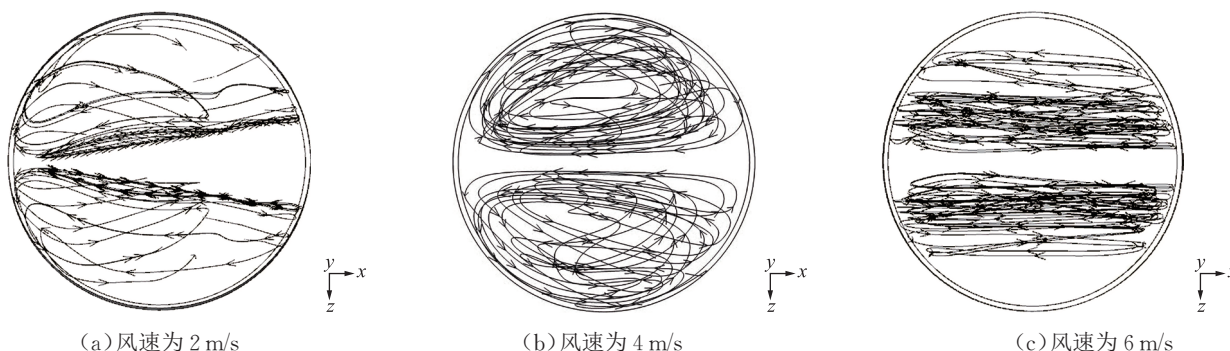


图 9 不同风速下内浮顶罐  $xz$  截面气体运动流线图

由不同风速下内浮顶罐内  $xy$  截面的气体运动流线图(图 10)可见,在不同风速下,罐内都会形成气体旋涡,但 2 m/s 风速下,在浮盘的前半部,存在一个贴着浮盘逆时针旋转的小型旋涡;从浮盘中部往后部分,存在一个顺时针旋转的大型旋涡“压”在前面的旋涡上,旋涡最大

变大,产生一段速度为 4.0~5.5 m/s 的大风速区,紧贴罐顶风速约为 5 m/s 的等值区域。

由罐壁迎风侧的压强云图(图 8a)可见,最大风压区在储罐的迎风侧中心偏上部区域,该区域与环境风几乎垂直,对环境风的阻滞最明显。压力从中心向两边逐渐减小,在储罐的两侧中心降到最低,且为负压。由储罐背风侧压强云图(图 8b)可见,压力开始回升,在风中心偏下区域,压力近似于 0,上方两侧由于回流影响,压力偏小。罐体迎风侧与背风侧的压强整体呈现对称。

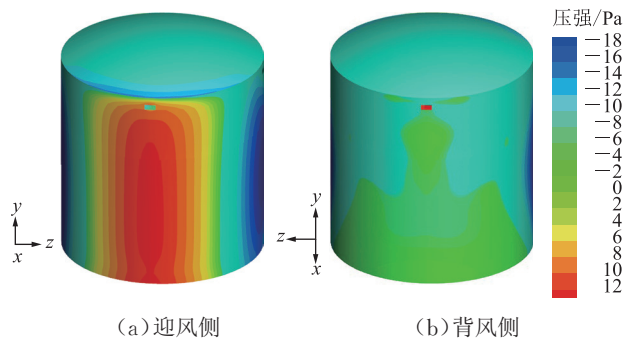


图 8 内浮顶罐迎风侧与背风侧压强云图

### 3.2 风速对内浮顶罐流场分布的影响

由不同风速下储罐内  $xz$  截面的气体运动流线图(图 9)可见,整体气流沿浮盘中心轴对称分布,气流的旋涡旋转方向都是上半部分顺时针旋转,在下半部分逆时针旋转。在 2 m/s 风速下,气流旋涡较小,且主要分布在浮盘靠近上风向部分,沿上风侧到下风侧风向两侧散开;在 4 m/s 风速下,气流旋涡开始增大,旋涡中心向后移动;在 6 m/s 风速下,气流旋涡增至最大,且几乎沿着浮盘中轴线平行对称分布。

部分的直径接近浮盘直径。结合  $xz$  截面气体运动流线图(图 9)可见,这两个旋涡均是沿浮盘中轴线对称分布,在 4 m/s、6 m/s 风速下的分布规律相似,均是随着环境风速增大,罐内风速也增大,对流加强,上面的大旋涡继续变大,最后吞并下面的小旋涡,使罐内气流统一按顺时

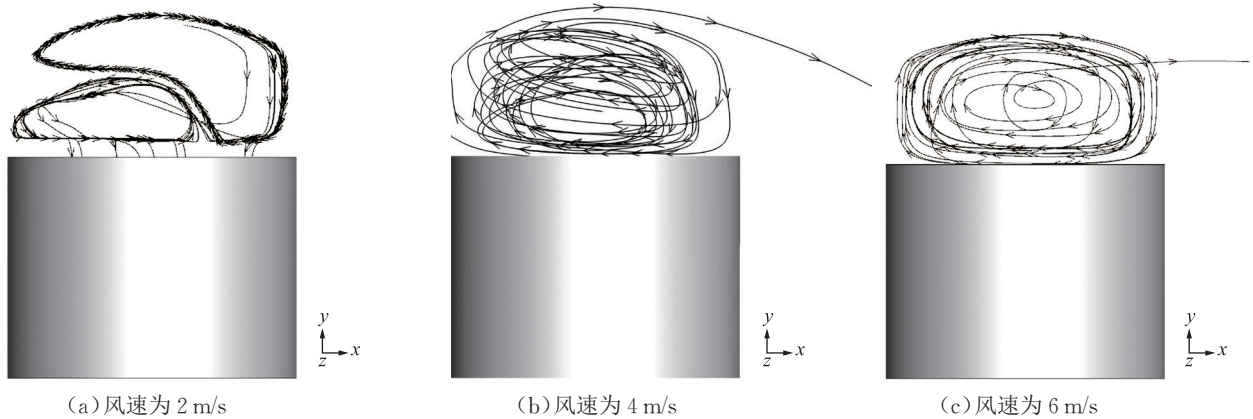


图10 不同风速下内浮顶罐 $xy$ 截面气体运动流线图

针方向运动,且随着风速的增大,上、下旋涡逐渐呈平行对称分布。

由4 m/s风速下内浮顶罐气体运动流线图(图11a)可见,环境风沿 $x$ 轴吹向内浮顶罐,气流从迎风侧气窗进入内浮顶罐中,向两侧分散,罐内气流逐渐形成旋涡,待旋涡在罐内充分发展后,罐内气体会从罐两侧以及背风侧气窗逸出。靠近浮盘中轴线的两束气流为强

势气流,流速较快,在撞击内浮顶罐后侧罐壁后,一部分气流从气窗中逸出,另一部分气流返回并在强势气流的压迫下,向两侧气窗推进,因此两侧气窗气体的逸出量会少于后侧气窗。由 $xy$ 截面气体运动流线图(图11b)可见,由于储罐的影响,罐的背风侧会形成旋涡,结合风速4 m/s下内浮顶罐周围风压云图(图6),罐外的流线规律符合风压规律。

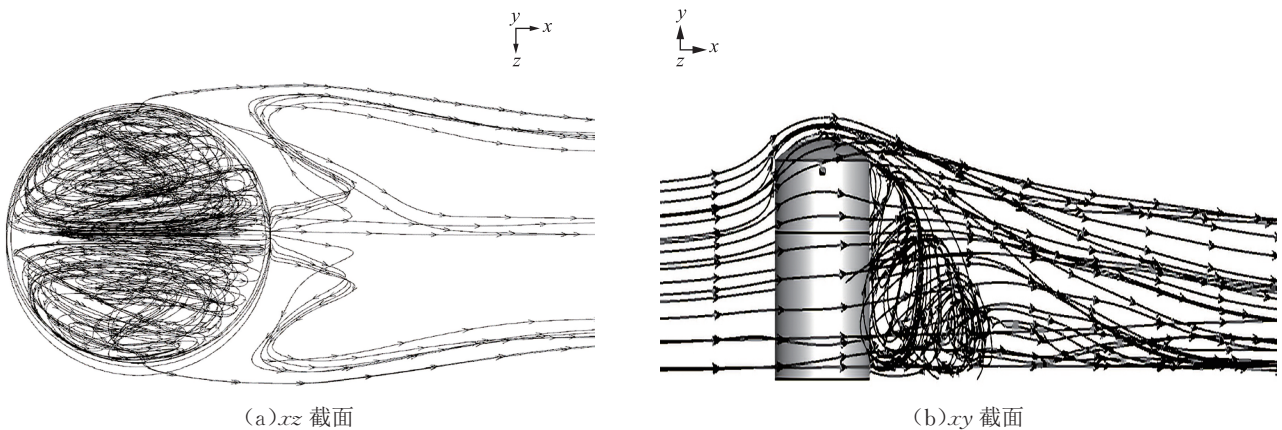


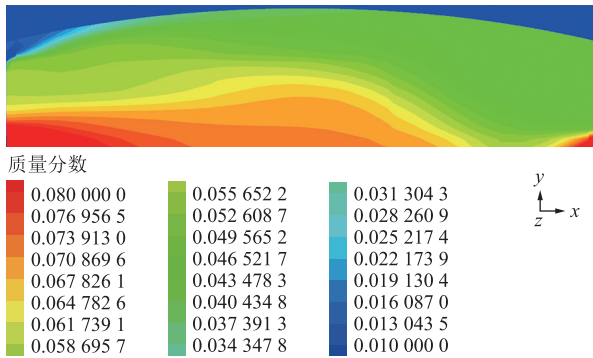
图11 风速为4 m/s时内浮顶罐气体运动流线图

### 3.3 风速对油气扩散浓度的影响及其传质机理

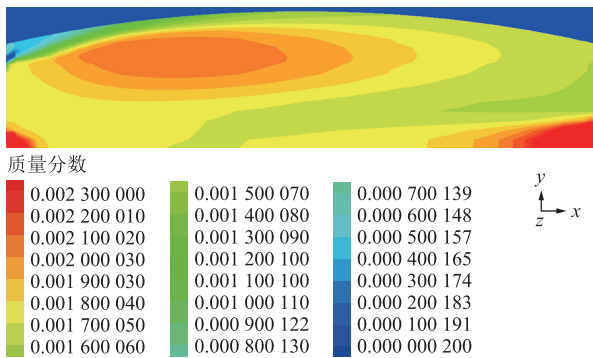
油气的扩散与风速密切相关,在不同风速下,罐内气体走势的分布规律不同,导致油气浓度、积聚的位置不同。由不同风速下内浮顶罐 $xy$ 截面的油气质量分数云图(图12)可见,当浮盘边圈发生泄漏时,油气主要位于边圈位置的上部,且有一定浓度的积攒,存在很大安全隐患,当风速为2 m/s时,结合罐内气体运动流线图可见,油气主要积攒在上风侧的浮盘边圈部分,在下风侧也有一部分积攒,上部空间油气的质量浓度较低;当风速为4 m/s时,由于此时罐内气体呈现大涡旋转,油气积攒在旋涡中心和下风向的浮盘缝隙上部,这是由于此时罐内气流为顺时针旋转,在气流与浮盘

的夹角位置风速很小,容易积聚油气;当风速为6 m/s时,罐内油气与4 m/s情况下的分布规律相似,由于风速加大,罐内旋涡变大,环境风带动油气从气窗流出,此时罐内油气整体浓度较低,上风侧油气主要积聚在浮盘缝隙上部,紧贴罐壁处,高度到达气窗位置时,被风吹动至后方,下风侧缝隙上方也有一小部分的油气积攒。

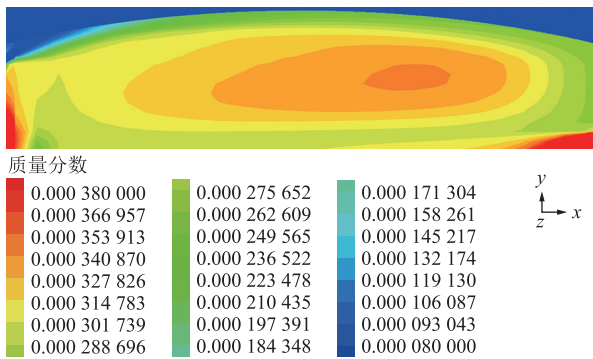
由不同风速下近地面 $xz$ 截面的油气质量分数云图(图13)可见,不同风速对油气扩散有显著影响,风速越小,油气越容易积聚,造成局部浓度过高。油气通过气窗泄漏后,受罐外风场及风压的影响,其浓度整体呈镜像分布,罐后方两侧的油气浓度会比中心区域高,



(a) 风速为 2 m/s



(b) 风速为 4 m/s



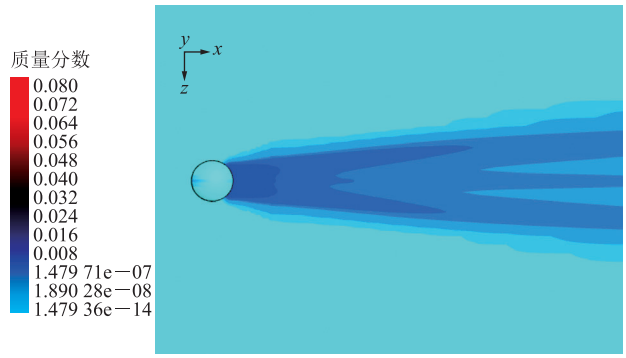
(c) 风速为 6 m/s

图 12 不同风速下内浮顶罐  $xy$  截面的油气质量分数云图

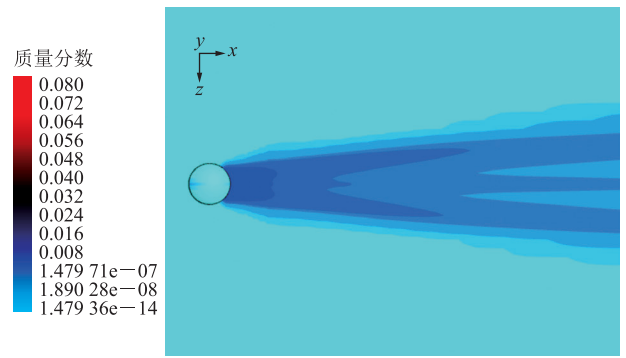
并随着距离的增加越发明显,油气扩散的整体规律符合上述流线规律。

### 3.4 油气泄漏引起的安全环保问题

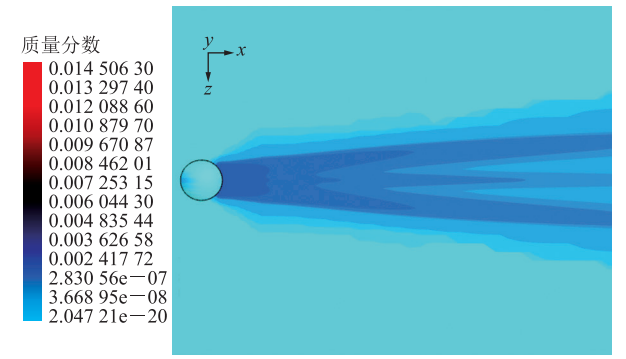
内浮顶罐浮盘由于年久失修、腐蚀等原因引起浮盘边圈发生严重油气泄漏时,泄漏的油气会积聚在浮盘上方区域,从而造成局部浓度过大,形成爆炸危险区域。正己烷的爆炸极限为 1.18%~7.4%(体积分数),当风速为 2 m/s 时,油气扩散的质量分数在浮盘边圈缝隙上方达到 8%,换算成体积分数为 2.63%,在爆炸极限范围内,存在很大的安全隐患。如果油气经储罐气窗扩散到罐外,当风速为 2 m/s 时,罐后方的油气质量分数达到 1.6%,超过 DB12/524—2014《工业企业挥发性有机物排放控制标准》规定的界定值,存在环境污



(a) 风速为 2 m/s



(b) 风速为 4 m/s



(c) 风速为 6 m/s

图 13 不同风速下近地面 ( $xz$  截面) 处油气质量分数云图

染隐患。因此,应加大设备维修力度、油气排放控制,甚至增加油气回收处理系统。随着风速增大,油气浓度开始下降,但在实际情况中,大部分天气状况为软风或轻风,风速为 1.6~5.4 m/s,因此应及时对内浮顶罐浮盘进行检查,定期维护,防止造成安全与环境污染问题。

## 4 结论

通过内浮顶罐油气泄漏扩散的风洞平台实验和数值模拟,得出以下结论:

(1) 实验结果表明,不同浮盘高度和风速会影响浮盘边圈泄漏的油品蒸发速率,风速越大,浮盘位置越

低,蒸发速率越快。建议 API 内浮顶罐蒸发损耗公式应考虑风速和浮盘高度的影响。

(2) 在环境风下,近罐壁处风速最小,迎风向罐壁面有一小层风速为负的回流层,储罐斜下后方和近地面处有大面积回流旋涡。罐壁迎风侧静压力最大,其次是背风侧,罐顶前沿有一部分负压区,储罐两侧压力最小。

(3) 风速对内浮顶罐油气质量浓度影响较大,风速越小,油气质量浓度越高,容易达到爆炸极限,罐外油气质量浓度可能会超过排放控制标准,存在安全和环境污染隐患。

(4) 在风速为 2~6 m/s 的过程中,罐内油气分布整体呈现对称状态,但旋涡中心从迎风侧逐渐向下后方移动,且旋涡随风速增加越来越大,最后呈现出近似平行对称的状态;罐外油气整体呈镜像分布,且随着距离增大而逐渐发散,罐后方两侧油气质量浓度比中心区域高,应重点监测罐内浮盘处和罐后方区域。

在今后的研究工作中,可从风向角度、罐数、防火堤阻碍等方面进一步探究油气泄漏扩散规律。

#### 参考文献:

- [1] 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: 82-83.  
HUANG W Q. Fundamental theory of oil vapor recovery and its application[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2011: 82-83.
- [2] ZHANG L, MA H, SHEN Z, WANG L Q, LIU R, PAN J. Influence of pressure and temperature on explosion characteristics of n-hexane/air mixtures[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 102: 52-60.
- [3] NECCI A, ARGENTI F, LANDUCCI G, COZZANI V. Accident scenarios triggered by lightning strike on atmospheric storage tanks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 127: 30-46.
- [4] LIU Y, FU Z, JIANG A, LIU Q Z, LIU B. FDTD analysis of the effects of indirect lightning on large floating roof oil tanks[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 139: 81-86.
- [5] WU D, CHEN Z. Quantitative risk assessment of fire accidents of large-scale oil tanks triggered by lightning[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 63: 172-181.
- [6] TAUSEEF S M, ABBASI T, POMPAPATHI V, ABBASI S A.

Case studies of 28 major accidents of fires/explosions in storage tank farms in the backdrop of available codes/standards/models for safely configuring such tank farms[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 120: 331-338.

- [7] AFSHAR-MOHAJER N, FOX M A, KOEHLER K. The human health risk estimation of inhaled oil spill emissions with and without adding dispersant[J]. Science of The Total Environment, 2019, 654: 924-932.
- [8] 司海涛. 大型浮顶罐主要安全事故类型及原因[J]. 油气储运, 2013, 32(9): 1029-1033.  
SI H T. Accident's type and cause of large-scale floating roof tank[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(9): 1029-1033.
- [9] 陈颖, 李丽娜, 杨常青, 郝郑平, 孙汉坤, 李瑶. 我国 VOC 类有毒空气污染物优先控制对策探讨[J]. 环境科学, 2011, 32(12): 3469-3475.  
CHEN Y, LI L N, YANG C Q, HAO Z P, SUN H K, LI Y. Countermeasures for priority control of toxic VOC pollution[J]. Environmental Science, 2011, 32(12): 3469-3475.
- [10] 刘君, 黄维秋, 彭群. 加油站油气扩散与回收效果的数值分析[J]. 环境工程学报, 2009, 3(5): 864-868.  
LIU J, HUANG W Q, PENG Q. Numerical analysis of gasoline vapor diffusion and recovery results in gasoline station[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(5): 864-868.
- [11] KIM E, PARK J, CHO J H, MOON I. Simulation of hydrogen leak and explosion for the safety design of hydrogen fueling station in Korea[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(3): 1737-1743.
- [12] KOUNTOURIOTIS A, ALEIFERIS P G, CHARALAMBIDES A G. Numerical investigation of VOC levels in the area of petrol stations[J]. Science of the Total Environment, 2014, 470/471: 1205-1224.
- [13] 郝庆芳, 黄维秋, 景海波, 李飞, 方洁, 纪虹, 等. 外浮顶罐不同孔隙油气泄漏扩散数值模拟[J]. 化工进展, 2019, 38(3): 1226-1235.  
HAO Q F, HUANG W Q, JING H B, LI F, FANG J, JI H, et al. Numerical simulation of oil vapor leakage and diffusion from different pore of external floating-roof tank[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(3): 1226-1235.
- [14] PORTELA G, GODOY L A. Wind pressures and buckling



- of cylindrical steel tanks with a dome roof[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2005, 61(6): 808-824.
- [15] 刘国梁, 宣捷, 杜可, 赵汝敖. 重烟羽扩散的风洞模拟实验研究[J]. *安全与环境学报*, 2004(3): 27-32.
- LIU G L, XUAN J, DU K, ZHAO R A. Wind tunnel experiments on dense gas plume dispersion[J]. *Journal of safety and Environment*, 2004(3): 27-32.
- [16] SABRANSKY I J, MELBOURNE W H. Design pressure distribution on circular silos with conical roofs[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1987, 26(1): 65-84.
- [17] MACDONALD P A, KWOK K C S, HOLMES J D. Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: I. Point pressure measurements on isolated structures[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1988, 31(2): 165-187.
- [18] HUANG W, HUANG F, FANG J, FU L P. 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.
- [19] LATEB M, MASSON C, STATHOPOULOS T, BEDARD C. Comparison of various types of  $k-\epsilon$  models for pollutant emissions around a two-building configuration[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, 115: 9-21.
- [20] 王福君. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 7-12, 113-126.
- WANG F J. Computational fluid dynamics analysis: principles and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 7-12, 113-126.
- [21] 方平治, 顾明, 谈建国, 栾桂汉. 阻塞率对表面风压系数影响的数值模拟[J]. *建筑科学与工程学报*, 2013, 30(3): 101-106.
- FANG P Z, GU M, TAN J G, LUAN G H. Numerical simulation of effect of blockage ratio on façade pressure coefficient[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2013, 30(3): 101-106.
- [22] BAETKE F, WERNER H. Numerical simulation of turbulent flow over surface-mounted obstacles with sharp edges and corners[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 35: 129-147.
- [23] BEKELE S A, HANGAN H. A comparative investigation of the TTU pressure envelope - Numerical versus laboratory and full scale results[J]. *Wind and Structures*, 2002, 5(2/3/4): 337-346.
- [24] USA Environmental Protection Agency (EPA). Emission factor documentation for AP-42 section 7.1: Organic liquid storage tanks: final report[R]. Washington D C: USA EPA, 2006: 38-116.
- [25] 赵晨露, 黄维秋, 石莉, 吴宏章, 王英霞, 杨光, 等. 内浮顶罐中油气扩散运移的数值模拟[J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(3): 72-77.
- ZHAO C L, HUANG W Q, SHI L, WU H Z, WANG Y X, YANG G, et al. Numerical simulation model of the oil-vapor diffusion and its migration from the internal floating-roof tank[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, 15(3): 72-77.
- [26] 陈亚楠, 赵东风, 韩丰磊, 卢磊, 欧阳振宇. 浮顶罐挥发性有机物排放量计算及控制措施[J]. *油气储运*, 2018, 37(5): 551-555.
- CHEN Y N, ZHAO D F, HAN F L, LU L, OUYANG Z Y. Emission calculation and control measures of the volatile organic compounds in floating roof tanks[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2018, 37(5): 551-555.
- [27] 谢飞, 罗炎平, 张玉龙. 大型浮顶罐密封圈油气泄漏扩散分析[J]. *消防科学与技术*, 2017, 36(10): 1458-1460.
- XIE F, LUO Y P, ZHANG Y L. Analysis on the diffusion of oil gas leakage with large floating roof tank seal ring[J]. *Fire Science and Technology*, 2017, 36(10): 1458-1460.
- (收稿日期: 2019-07-03; 修回日期: 2020-02-18; 编辑: 杜娟)
- 基金项目:** 国家自然科学基金资助项目“储油罐石油蒸发及油气排放扩散的数值模拟及风洞实验研究”, 51574044; 江苏省重点研发计划项目“产业前瞻与共性关键技术”, BE2018065; 江苏省研究生科研与实践创新计划项目“浮顶罐内油品蒸发损耗的数值模拟及风洞实验”, KYCX18\_2634.
- 作者简介:** 黄维秋, 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 2004年博士毕业于南京理工大学应用化学专业, 现主要从事油气回收基础理论及其应用等方面的科研与教学工作。地址: 江苏省常州市武进区湖湖中路21号常州大学石油工程学院, 213164。电话: 0519-85280250。Email: hwq213@cczu.edu.cn