

# 覆土油罐油气泄漏扩散数值模拟

刘 瑞 王 冬 张培理 梁建军 姜俊泽 段纪淼 郭子航

陆军勤务学院油料系, 重庆 401331

**摘 要:** 为了研究覆土油罐油气泄漏过程中油气时空分布规律, 基于湍流  $k-\varepsilon$  标准模型, 对某油库覆土油罐油气在罐室内泄漏扩散进行数值模拟研究, 探究油气在油罐泄漏后扩散轨迹, 分析油气在覆土油罐罐室内水平方向和竖直方向上油气体积浓度随时间变化规律。研究表明: 油气扩散过程划分为准静态期、梯度上升期和稳定期; 准静态期在相同高度处相等, 高度越高准静态期越长; 梯度上升期随高度升高而油气体积浓度增长速率越小, 紊流区内相同高度处距离泄漏口越近油气体积浓度增长速率越大, 稳定区内相同高度处油气体积浓度增长速率相同; 在稳定期内随高度增加油气体积浓度减小, 罐室内油气体积浓度达到稳定期所需时间相同, 紊流区内相同高度距离泄漏口越近油气体积浓度越大且相对泄漏口呈对称分区存在, 但稳定区内相同高度处油气体积浓度相同。罐室内超过一定高度时油气体积浓度低于安全油气体积浓度, 即处于安全区。研究结果对安全处置覆土油罐油气泄漏具有重大意义。

**关键词:** 覆土油罐; 油气; 泄漏; 扩散; 分布; 数值模拟

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2020.06.022

## Numerical Simulation of Hydrocarbon Gas Leakage Diffusion in Covered Oil Tank

Liu Rui, Wang Dong, Zhang Peili, Liang Jianjun, Jiang Junze, Duan Jimiao, Guo Zihang

Department of Oil, Army Logistics University of PLA, Chongqing, 401331, China

**Abstract:** In order to study the temporal and spatial distribution of gas in the event of gas leakage in overlying oil tanks, based on the turbulence  $k-\varepsilon$  standard model, the numerical simulation of oil and gas leakage diffusion of a tank chamber in an overburden oil tank is carried out. The dispersion trajectory of hydrocarbon gas after oil tank leakage is explored and the variation law of hydrocarbon gas concentration with time in horizontal and vertical direction in the covered oil tank chamber is analyzed. The results show that the hydrocarbon gas dispersion process is divided into quasi-static period, gradient rising period and stable period. The quasi-static period is the same at the same height, and the higher the height, the longer the quasi-static period will be. In the gradient rising period, as the height increases, the smaller the hydrocarbon gas concentration growth rate is. In the disturbance area, the closer to the leakage at the same height, the higher the hydrocarbon gas concentration growth rate will be. In the stable area, the faster the

收稿日期: 2020-05-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51704301); 基础加强计划项目资助(2019-JCJQ-JJ-024); 火灾与爆炸安全防护重庆市重点实验室资助(2010 CA 0005)

作者简介: 刘 瑞(1989-), 男, 安徽长丰人, 硕士研究生, 研究方向为油气安全与防护技术。E-mail: 1205460508@qq.com

volume concentration growth rate, the same the hydrocarbon gas volume concentration growth rate is with the same height. The lower the hydrocarbon gas volume concentration is with the increase of the height, the time required for the hydrocarbon gas volume concentration in the tank chamber to reach the stable period is the same. The closer to the leakage at the same height within the disturbance area, the greater the hydrocarbon gas volume concentration will be and the relative leakage point is symmetrical, but the hydrocarbon gas volume concentration in the stable area is the same with the same height. It is also found that when hydrocarbon gas volume concentration is lower than the safe hydrocarbon gas volume concentration over a certain height, namely the safe zone. The research results are of great significance for the safe handling of hydrocarbon gas leakage in covered oil tanks.

**Keywords:** Covered tank; Hydrocarbon gas; Leakage; Dispersion; Distribution; Numerical simulation

## 0 前言

油气具有低闪点和易挥发的特性,常温下易引起燃烧,与空气混合后会形成可燃爆炸性混合物,在受限空间遇明火或者高热能极易发生燃烧爆炸,形成超压,具有极强破坏力。覆土油罐罐室作为典型油气受限空间,研究其油气泄漏传质特性、分布规律、发展运动规律,在实践应用中对安全处置覆土油罐油气泄漏具有重大意义。

目前,国内外对扩散的研究方法主要有理论研究、实验研究和数值模拟研究。理论研究方面,以数学模型研究为主,国外研究起步相对较早,建立了很多气体泄漏扩散模型。从简单的高斯模型、唯象模型<sup>[1]</sup>、Sutton 模型<sup>[2-3]</sup>、箱及相似模型<sup>[4-5]</sup>,再到复杂的浅层模型<sup>[6]</sup>和三维有限元模型<sup>[7-9]</sup>等。这些模型主要用于危险性气体连续或瞬时泄漏时,在大气环境中的输运和扩散过程,以及时空分布及各因素对扩散速度的影响作用。实验研究方面,主要是气体泄漏扩散现场实验<sup>[10]</sup>、气体泄漏扩散风洞实验<sup>[11]</sup>、气体泄漏扩散模拟实验研究<sup>[12]</sup>等。数值模拟研究方面,通过计算机模拟分析得到危险性气体扩散的特征规律及关键现象<sup>[13]</sup>,刘冲等人<sup>[14]</sup>基于 WALE 模型和 Zimont 预混火焰模型对狭长密闭空间内汽油—空气混合物爆炸火焰特性进行了数值模拟研究。数值模拟能描述气体扩散蔓延过程中的物理现象,可以直接反映扩散过程中速度场、温度场和浓度场的变化<sup>[15]</sup>。

国内外研究直接与覆土油罐油气泄漏扩散相关文献很少,油气危险源扩散蔓延规律、关键特征和机理等方面的基础理论研究较缺乏。但危险性气体泄漏扩散研究较多,在一定程度上为本文研究提供了参考<sup>[16-18]</sup>。随着计算机技术突飞猛进,数值模拟研究运用越来越广,本文利用仿真软件对覆土油罐油气泄漏扩散进行数值模拟研究,分析扩散规律及其实际应用。

## 1 构建覆土油罐油气泄漏模型

### 1.1 覆土罐室计算域几何模型及网格划分

利用某油库覆土油罐罐室空间原形尺寸构建模型,

内径 15 725 mm、外径 16 825 mm、壁高 5 900 mm、内顶高 7 600 mm、外顶高 9 130 mm、罐室通道门下底边高 5 900 mm、通道宽 1 740 mm、通道高 1 880 mm。假设泄漏口处于油罐最下面一圈钢板焊缝处,裂缝高 1 500 mm、宽 100 mm,上部 4 个小采光口内径 520 mm 和中心 1 个采光口内径 720 mm。划分网格采用四面体划法,网格数 113 392,节点数 24 698,覆土油罐罐室计算域模型见图 1,覆土油罐罐室计算域网格见图 2。

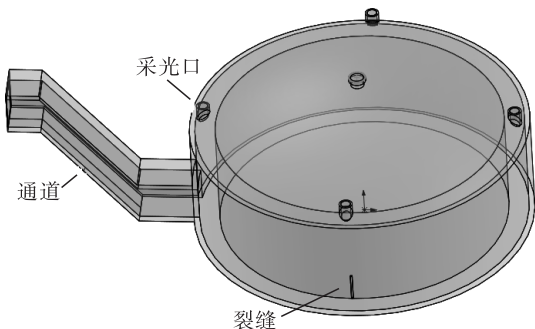


图 1 覆土油罐罐室计算域模型图

Fig. 1 Calculation domain model diagram of covered oil tank chamber

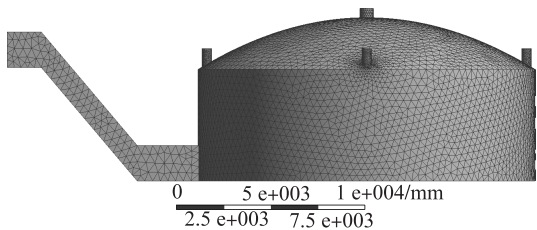


图 2 覆土油罐罐室计算域网格划分图

Fig. 2 Grid division diagram of calculation domain of covered oil tank chamber

### 1.2 基本假设和控制方程

覆土油罐罐室内油气泄漏扩散过程是典型瞬态传质扩散过程,影响因素众多,为研究分析油气传质特性得出相应规律,做以下假设和简化:

1)覆土油罐罐室内在油气泄漏之前为空气,初始气

体分布均匀,无流动,气压为标准大气压,遵循理想气体状态方程。

2) 气体的整个运动过程维持热平衡,忽略其温度差异和热量传递。

3) 覆土油罐罐室内仅考虑空气(仅考虑  $O_2$  和  $N_2$  构成)与油气(后文中所有油气均指  $C_8H_{18}$ ),不考虑其他组分的混合气体,该混合气体视为理想气体,遵循理想气体状态方程,扩散过程中不发生化学反应。

基于以上的简化和假设,覆土油罐油气泄漏过程是无化学反应的瞬态单相多组分扩散问题。因此,需要根据连续性方程、N-S 动量方程和组分方程建立基本控制方程组。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

(1)

N-S 动量方程:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + (\rho - \rho_e) g_i$$

(2)

组分方程:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i M) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( D \frac{\partial M}{\partial x_i} \right)$$

(3)

式中: $u_i$  为  $x,y,z$  方向上的速度,  $m/s$ ;  $p$  为压力,  $Pa$ ;  $x_i$  为对应  $x$  坐标,  $m$ ;  $D$  为扩散系数,  $m^2/s$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $M$  为  $N_2$  的质量浓度,  $kg/m^3$ ;  $\mu$  为流体运动黏度,  $kg/m \cdot s$ ;  $\rho$  为  $N_2$  密度,  $kg/m^3$ ;  $\rho_e$  为混合气体密度,  $kg/m^3$ ;  $t$  为时间,  $s$ 。

1.3 湍流模型

覆土油罐罐室油气扩散过程适用于湍流模型  $k-\varepsilon$  标准模型、紊流动能方程  $k$  和紊流耗散方程  $\varepsilon$ ,可以处理

浮力和压缩性等物理现象。覆土油罐油气泄漏适用于湍流模型,因此宜采用  $k-\varepsilon$  标准模型。

1.4 初始条件和边界条件

考虑覆土油罐实际情况,假设油罐最下层一圈钢板焊缝因腐蚀而形成裂缝  $1.5\text{ m} \times 0.1\text{ m}$  的泄漏口,以覆土油罐罐顶的 5 个采光口作为排出口,其中中心 1 个采光口内径  $720\text{ mm}$ ,周围分布 4 个小采光口内径  $520\text{ mm}$ 。假设仅剩余底油和油泥,设油气占体积分数  $5\%$ <sup>[19]</sup>,空气占体积分数  $95\%$ 。覆土油罐罐室内泄漏油气仅有自身扩散,扩散速度较小,故设油气扩散速度  $0.06\text{ m/s}$ <sup>[20]</sup> 较为合理。罐室内计算域泄漏之前成分为空气,设置环境温度  $293.15\text{ K}$ ,压力为 1 个标准大气压,覆土罐顶 5 个采光口设为压力出口,相对压力为 0。

1.5 求解算法

PISO 算法不需要迭代,既具有与迭代的全隐式算法相同的精度,又可以取较大的时间步长,对可压缩及不可压缩流动均适合。本文覆土油罐罐室油气泄漏扩散数值模拟是典型的瞬态扩散问题,因此采用 PISO 算法对离散后的控制方程进行求解更具优势。

2 计算结果分析

2.1 水平方向油气体积浓度随时间变化规律

为获取同一平面不同位置及同一位置不同高度相关数据取以下 16 个点坐标,以便进行相应研究,相应坐标可见表 1 和图 3。

表 1 覆土油罐罐室内部监测点坐标表

Tab. 1 Coordinates of monitoring points in the interior of covered oil tank chamber

| A 位置坐标 /m        | B 位置坐标 /m        | C 位置坐标 /m         | D 位置坐标 /m         |
|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| A 1(0,8.412 5,0) | B 1(8.412 5,0,0) | C 1(0,-8.412 5,0) | D 1(-8.412 5,0,0) |
| A 2(0,8.412 5,2) | B 2(8.412 5,0,2) | C 2(0,-8.412 5,2) | D 2(-8.412 5,0,2) |
| A 3(0,8.412 5,4) | B 3(8.412 5,0,4) | C 3(0,-8.412 5,4) | D 3(-8.412 5,0,4) |
| A 4(0,8.412 5,6) | B 4(8.412 5,0,6) | C 4(0,-8.412 5,6) | D 4(-8.412 5,0,6) |

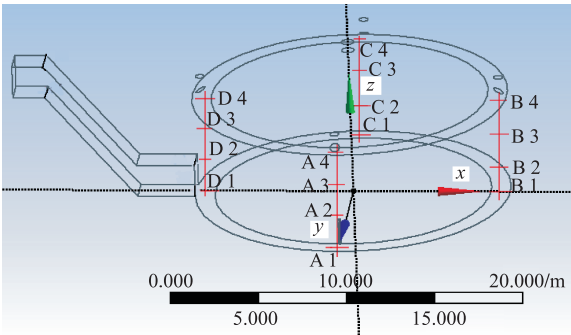


图 3 坐标点位置图

Fig. 3 Coordinate point location map

对覆土油罐罐室内部高度分别为 0、2、4、6 m 的油气体积浓度变化规律,分别绘出相应曲线及油气体积浓度云图,见图 4~8。通过图 4(除图 4-a))可看出,曲线随时间变化分为准静态期、梯度上升期和稳定期。准静态期,油气从泄漏口扩散到该监测点的时间差,即预警时间。梯度上升期,该点刚检测油气直到油气体积浓度达到稳定状态前时间。稳定期,油气体积浓度几乎不再改变,波动范围很小。

图 4-a) 中监测点 A 1 位置正对泄漏口,距离短准静态期极短,图 4-b)~d) 中准静态期也较短,与监测点 A 1

相差不大。通过观察发现监测点 A 1、B 1、C 1 和 D 1 油气体积浓度不断升高,到达稳定期时间约 30 000 s。图 5 中监测点 A 1、B 1、C 1 和 D 1 分别收敛于 2.25%、1.4%、1.3% 和 1.4%。各监测点在梯度上升期速率不一样,距泄漏口越近,速率越快,稳定期油气体积浓度也

较高。监测点 B 1 和 D 1 的油气体积浓度变化曲线重合,两者处于对称位置。图 6 稳定期后,在同一高度不同位置处油气体积浓度存在分区现象,泄漏口附近区域油气体积浓度较高,监测点 B 1 和 D 1 附近区域油气体积浓度次之,在监测点 C 1 附近区域油气体积浓度最低。

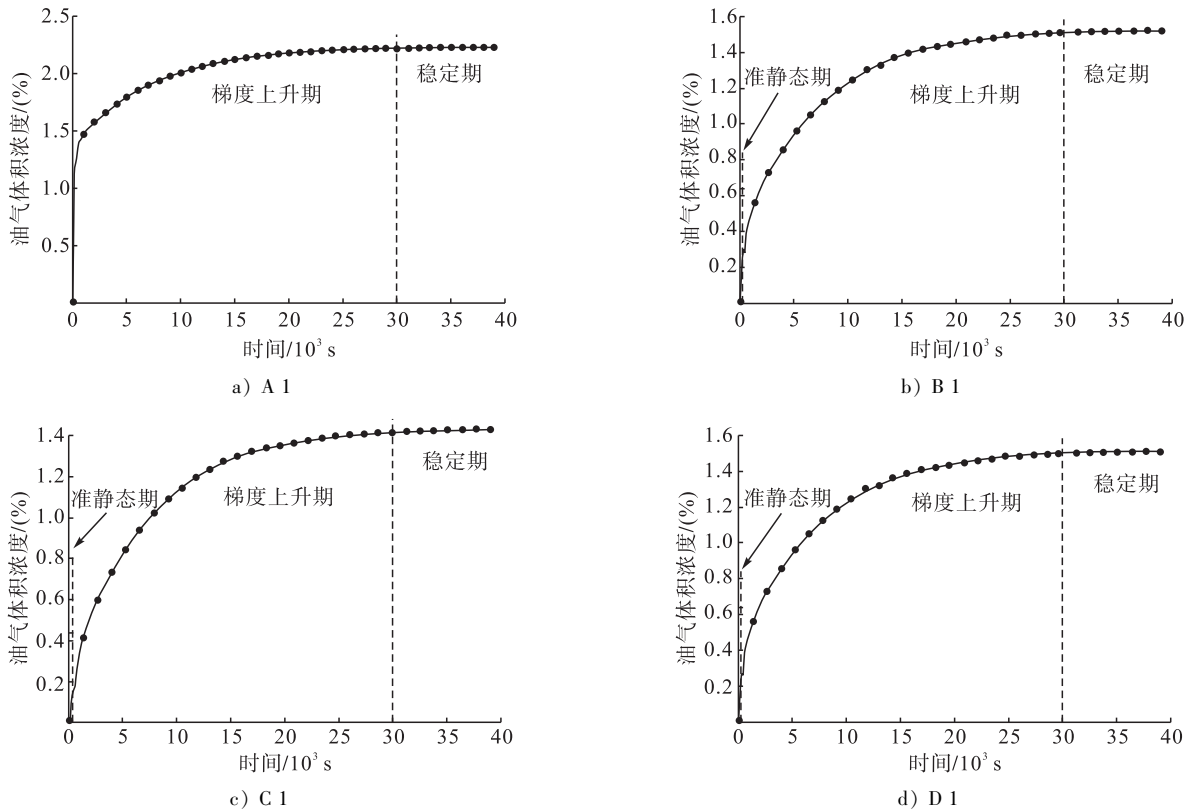


图 4 高度 0 m 时油气体积浓度变化曲线图

Fig. 4 Variation curve of hydrocarbon gas volume concentration at height 0 m

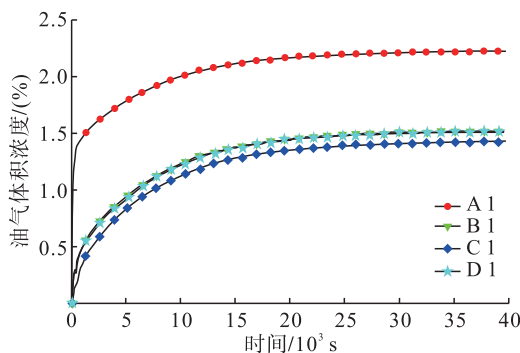


图 5 高度 0 m 时油气体积浓度对比变化曲线图

Fig. 5 Variation curve of hydrocarbon gas volume concentration comparison at height 0 m

覆土油罐罐室内部高度 2 m 时,与 0 m 时有类似结论。准静态期比高度 0 m 时相应准静态期时间长,这是整体高度增加 2 m 的缘故。尽管泄漏口上沿距离监测点 A 2 只有 0.5 m,但是在该监测点也出现准静态期,这是因为泄漏口排出的油气在重力作用下先下沉再向上扩散。通过图 7 分析,高度 2 m 时,监测点 A 2、B 2、C 2 和 D 2 曲线重合,准静态期相同,梯度上升期变化速率相

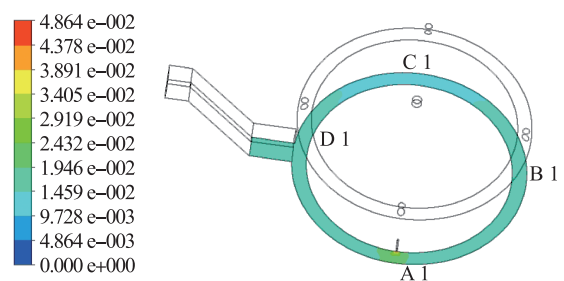


图 6 高度 0 m 时趋于稳定期油气体积浓度云图

Fig. 6 Hydrocarbon gas volume concentration cloud map of the stabilization stage at height 0 m

同,在稳定期油气体积浓度收敛于 1.3%。在图 8 油气体积浓度云图中高度 2 m 时,平面上油气体积浓度相同。

同理,覆土油罐罐室内部高度 4 m 时,与 2 m 时有类似规律。在高度 4 m 处,稳定期油气体积浓度集中收敛于 1.05%,在高度 4 m 时稳定期油气体积浓度波动范围很小。

覆土油罐罐室内部高度 6 m 时,具有前文类似结论,但没有梯度上升期,进入稳定期之前油气体积浓度有剧

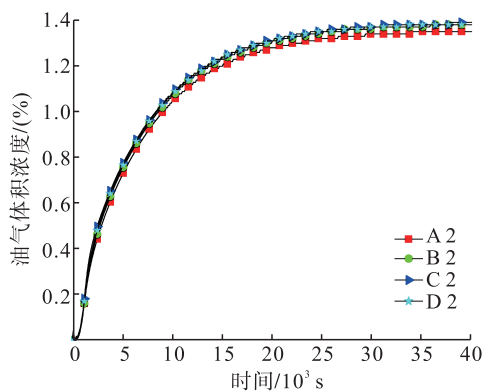


图7 高度2 m时油气体积浓度对比变化曲线图

Fig. 7 Variation curve of hydrocarbon gas volume concentration comparison at height 2 m

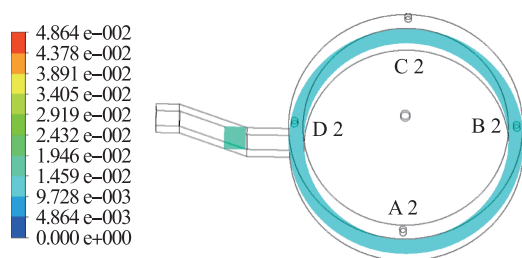
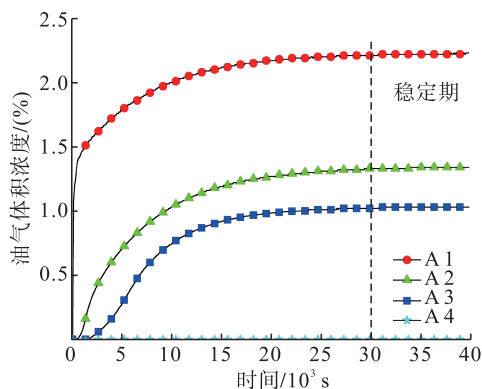


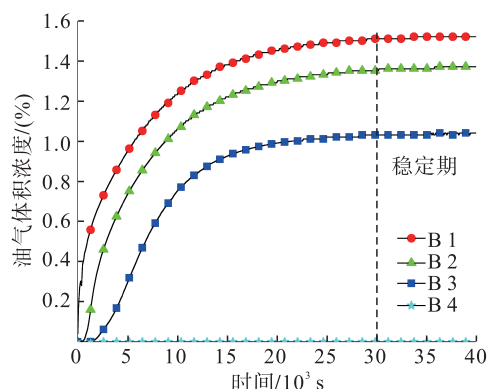
图8 高度2 m时油气体积浓度云图

Fig. 8 Hydrocarbon concentration cloud map at height 2 m



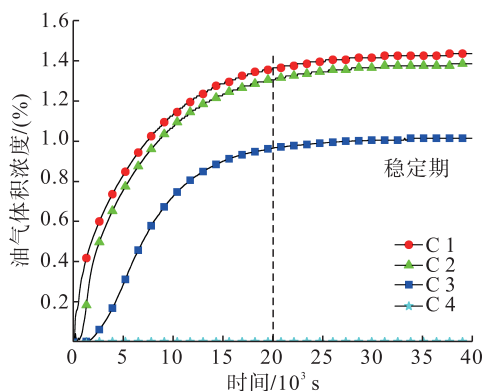
a) A 位置

a) A location



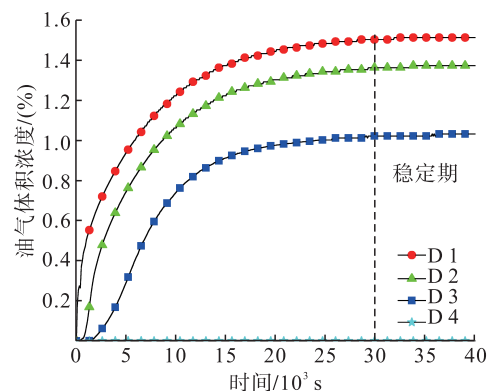
b) B 位置

b) B location



c) C 位置

c) C location



d) D 位置

d) D location

图9 同位置不同高度油气体积浓度变化曲线图

Fig. 9 Variation curves of hydrocarbon gas volume concentration at different heights at the same location

烈波动阶段,然后恢复低油气体积浓度。油气体积浓度波动是油气扩散到顶部时,由拱顶阻挡造成油气短时间集聚,后油气逐渐向采光口扩散,油气体积浓度下降,稳定期后油气体积浓度较低。在高度6 m时最高油气体积浓度为0.000 65%,处于绝对安全油气体积浓度范围内。

水平方向油气体积浓度随时间变化规律如下:

1) 油气扩散过程中各点油气体积浓度随时间变化分为准静态期、梯度上升期和稳定期。在同一高度准静态期相同,达到稳定期所需时间相同。

2) 在同一高度不同位置点油气体积浓度随时间不断增高,除顶部有短期波动外,油气体积浓度很小且在安全油气体积浓度范围内,总体上油气体积浓度不断上升。

3) 在高度2、4、6 m达到稳定期时,油气体积浓度在同一高度处相同,在高度0 m达到稳定期时油气体积浓度在底部不相等且分区存在,泄漏口附近油气体积浓度最高,距离泄漏口越远油气体积浓度越低,相对于泄漏口呈现对称分布。

## 2.2 竖直方向油气体积浓度随时间变化规律

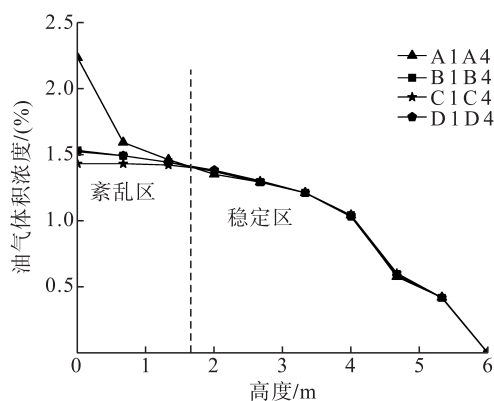
研究竖直方向油气体积浓度变化规律,绘出油气体积浓度变化曲线见图9。

由图9-a)分析得出各点油气体积浓度随时间逐渐增加。A1、A2、A3和A4准静态期逐渐延长,梯度上升期油气体积浓度增长速率越来越小,随高度增加稳定期油气体积浓度收敛值越小,在约30 000 s时达到稳定期。同理,图9-b)~d)也能得到类似结论。在图9中,比较相应监测点A1和A2、B1和B2、C1和C2、D1和D2在稳定期的油气体积浓度差值分别为0.89、0.15、0.05、0.15,能够发现:

$$V_c(A1 A2) > V_c(B1 B2) = V_c(D1 D2) > V_c(C1 C2) \quad (5)$$

同理得出:

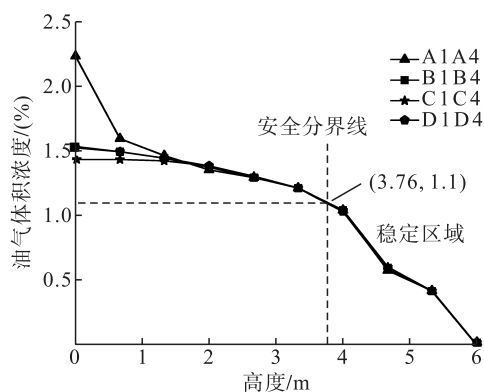
$$V_c(A2 A3) = V_c(B2 B3) = V_c(C2 C3) = V_c(D2 D3) = 0.35 \quad (6)$$



a) 区域划分  
a) Area division

$$V_c(A3 A4) = V_c(B3 B4) = V_c(C3 C4) = V_c(D3 D4) = 1.02 \quad (7)$$

由式(5)可知,在高度0~2 m内油气体积浓度没有均匀分布,为了揭示覆土油罐罐室内部油气体积浓度随高度变化规律,取出线段A1A4、B1B4、C1C4和D1D4在稳定期后油气体积浓度随高度变化曲线,见图10-a)。研究发现覆土油罐罐室内部竖向油气体积浓度在稳定期存在分区现象,罐室1.7 m以下区域称紊乱区,此区域内除相对于泄漏口处于对称位置油气体积浓度相同,其它任何两点油气体积浓度都不相同;罐室1.7 m以上称为稳定区,此区域内位于同一高度油气体积浓度就相同。根据相关规定汽油(液体)的爆炸极限安全油气体积浓度为1.1%,分析图10-b)可知高度超过3.76 m即为安全区。



b) 安全区域  
b) Safe zone

图10 稳定期四条线段油气体积浓度随高度变化曲线图

Fig. 10 Variation curve of hydrocarbon gas volume concentration varying with height in four line segments at a stable period

竖直方向油气体积浓度随时间变化规律如下:

1) 总体上看,竖直方向各监测点油气体积浓度随时间增加而不断升高,且高度越高稳定期油气体积浓度越低。准静态期随高度增加而延长,即预警响应时间逐渐延长。监测点几乎同时达到稳定期,时间约30 000 s。

2) 梯度上升期内,竖直方向高度升高油气体积浓度增长速率越小。在紊乱区,同一水平面上越靠近泄漏口油气体积浓度增长速率越快;在稳定区,同一水平面上油气体积浓度增长速率几乎相同。在覆土油罐罐室顶部区域油气体积浓度变化极小,油气体积浓度极低且处于安全油气体积浓度以下。

3) 稳定期内,竖直方向高度升高油气体积浓度越低。在紊乱区,同一水平面上距离泄漏口越近油气体积浓度越大。覆土油罐罐室内部除了相对于泄漏口处于对称位置,油气体积浓度相同。在稳定区,同一水平面上油气体积浓度相同。当高度超过3.76 m、油气体积浓度低于1.1%时,即为安全区。

### 3 结论

本文主要研究某油库覆土油罐油气泄漏扩散过程,利用仿真软件对其进行数值模拟,得到以下结论:

1) 油气扩散过程中各点油气体积浓度随时间变化分为准静态期、梯度上升期和稳定期。除罐室顶部有一个短期波动,变化极小范围且处于安全油气体积浓度以下,总体上油气体积浓度随时间增长而上升。

2) 准静态期同一高度处则相等,高度越高准静态期就越长,即预警响应时间就越长。

3) 梯度上升期内,竖直方向上随高度升高油气体积浓度增长速率越慢。在紊乱区(高度 $\leq 1.7$  m)内同一高度越靠近泄漏口油气体积浓度增长速率越快。在稳定区(高度 $> 1.7$  m)同一高度油气体积浓度增长速率相同。

4) 稳定期内,竖直方向上随高度升高油气体积浓度越低,达到稳定期所需时间约30 000 s。在紊乱区,同一高度距离泄漏口越近油气体积浓度越大且相对于泄漏口呈对

称分布。而在稳定区,同一高度处油气体积浓度浓度相同。当高度超过 3.76 m 时,油气体积浓度低于 1.1%,即为安全区。

#### 参考文献:

- [1] Lima W J, Lobato F S, Arouca F O. Solution of Inverse Anomalous Diffusion Problems Using Empirical and Phenomenological Models [J]. Heat and Mass Transfer, 2019, 55 (11): 3053 - 3063.
- [2] 丁信伟,王淑兰,徐国庆. 可燃及毒性气体泄漏扩散研究综述[J]. 化学工业与工程, 1999, 16(2): 58 - 62.  
Ding Xinwei, Wang Shulan, Xu Guoqing. A Review of Studies on the Discharging Dispersion of Flammable and Toxic Gases [J]. Chemical Industry and Engineering, 1999, 16 (2): 58 - 62.
- [3] 胡世明,张政,魏丽军,等. 危险物质意外泄漏的重气扩散数学模拟(1)[J]. 劳动保护科学技术, 2000(2): 31 - 34.  
Hu Shiming, Zhang Zheng, Wei Lijun, et al. Mathematical Simulation of Heavy Gas Diffusion for Accidental Leakage of Hazardous Substances (1) [J]. Science and Technology of Labour Protection, 2000 (2): 31 - 34.
- [4] Kusuma J, Ribal A, Mahie A G, et al. On FTCS Approach for Box Model of Three-Dimension Advection-Diffusion Equation [J]. International Journal of Differential Equations, 2018, 2018 (11): 7597861 - 1 - 9.
- [5] Kirillin G, Aslamov I, Kozlov V, et al. Turbulence in the Stratified Boundary Layer Under Ice: Observations from Lake Baikal and a New Similarity Model [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24 (4): 1691 - 1708.
- [6] Kian R, Horrillo J, Zaytsev A, et al. Capturing Physical Dispersion Using a Nonlinear Shallow Water Model [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2018, 6 (3): 84.
- [7] Geng B, Zhao M. A Three-dimensional Arbitrary Lagrangian-Eulerian Petrov-Galerkin Finite Element Model for Fully Nonlinear Free-surface Waves [J]. Ocean Engineering, 2014, 91: 389 - 398.
- [8] Würtz J, Bartzis J, Venetsanos A, et al. A Dense Vapour Dispersion Code Package for Applications in the Chemical and Process Industry [J]. Journal of Hazardous Materials, 1996, 46 (2 - 3): 273 - 284.
- [9] Hankin R K S, Britter R E. TWODEE: The Health and Safety Laboratory's Shallow Layer Model for Heavy Gas Dispersion. Part II Model Validation [J]. Journal of Hazardous Materials, 1999, 5: 227 - 240.
- [10] Puttock J S, Blackmore D R. Field Experiments on Dense Gas Dispersion [J]. Journal of Hazardous Materials, 1982, 6 (1 - 2): 13 - 18.
- [11] Merony R N. Wind-tunnel Experiments on Dense Gas Dispersion [J]. Journal of Hazardous Materials, 1982, 6 (1 - 2): 85 - 90.
- [12] 石秀真. 有限空间内氨泄漏的扩散规律[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.  
Shi Xiuzhen. Diffusion Law of Ammonia Leakage in Finite Space [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.
- [13] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
Wang Fujun. Computational Fluid Dynamics Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [14] 刘冲, 杜扬, 李国庆, 等. 狭长密闭空间内油气爆炸火焰特性大涡模拟[J]. 化工学报, 2018, 69(12): 5348 - 5358.  
Liu Chong, Du Yang, Li Guoqing, et al. Large Eddy Simulation of Gasoline-air Mixture Explosion in Closed Narrow-long Space [J]. CIESC Journal, 2018, 69 (12): 5348 - 5358.
- [15] 余金伟, 冯晓锋. 计算流体力学发展综述[J]. 现代制造技术与装备, 2013(6): 25 - 26.  
Yu Jinwei, Feng Xiaofeng. CFD Development Review [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2013 (6): 25 - 26.
- [16] 席学军, 邓云峰. 城市地区毒气扩散事故数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2006, 2(6): 35 - 38.  
Xi Xuejun, Deng Yunfeng. Numerical Simulation on Poison Gas Pollutant Dispersion in Urban Areas [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2006, 2 (6): 35 - 38.
- [17] 李又绿, 姚安林, 李永杰. 天然气管道泄漏扩散模型研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(8): 102 - 104.  
Li Youlu, Yao Anlin, Li Yongjie. Study on Diffusion Model of Gas Pipeline Leaking [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24 (8): 102 - 104.
- [18] 潘旭海, 华敏, 蒋军成. 环境条件对 LNG 泄漏扩散影响的模拟研究[J]. 天然气工业, 2009, 29(1): 117 - 119.  
Pan Xuhai, Hua Min, Jiang Juncheng. Simulation Research on the Influence of Environmental Conditions on LNG Leakage and Dispersion [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29 (1): 117 - 119.
- [19] 杨宏伟, 费逸伟. 固定顶油罐内气体空间油气浓度分布[J]. 石化技术, 2004, 11(4): 15 - 17.  
Yang Hongwei, Fei Yiwei. Concentration Distributing of Oil Gas in Fixed Roof Tank [J]. Petrochemical Industry Technology, 2004, 11 (4): 15 - 17.
- [20] 周毅. 山洞油库油气扩散蔓延的模拟研究[D]. 重庆: 解放军后勤工程学院, 2012.  
Zhou Yi. Simulative Study of Oil Gas Spread and Dispersion in Underground Petroleum Depot [D]. Chongqing: Logistical Engineering University, 2012.