

引用格式:王旭,廖柯熹,张志坚,等.基于FLACS的汽油储罐可燃气体泄漏的流场分析[J].北京化工大学学报(自然科学版),2022,49(2):31-38.

WANG Xu, LIAO KeXi, ZHANG ZhiJian, et al. Flow field analysis of combustible gas leakage in gasoline storage tank based on FLACS[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2022,49(2):31-38.

基于 FLACS 的汽油储罐可燃气体泄漏的流场分析

王旭¹ 廖柯熹² 张志坚³ 曾昭雄³ 王思汗¹ 向粟林¹

(1. 中国石油天然气管道工程有限公司, 廊坊 065000; 2. 西南石油大学 石油与天然气工程学院, 成都 610500;

3. 国家管网集团西南管道有限责任公司, 成都 610036)

摘要:罐区油品储存量大,具有较高的泄漏风险,一旦发生泄漏,可燃气体遇火源易发生火灾、爆炸等事故,甚至引发后果更为严重的多米诺效应,而可燃气体探测器作为重要的保护层持续监控现场,对保障现场安全生产和风险预警具有重大意义。以某罐区汽油泄漏为例,通过 FLACS 软件建立汽油储罐泄漏扩散计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 模型,根据现行标准 GB/T 50493—2019 在泄漏源周围设置候选监测点,结果表明:部分距泄漏源 10 m 范围内的监测点不能检测到可燃气体,说明探测器的设置应遵循可燃气体扩散规律;对于比空气重的可燃气体的检测,建议探测器的最佳安装高度为 0.3 m。

关键词:可燃气体探测器; FLACS; 汽油储罐; 泄漏扩散

中图分类号: TE8 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2022.02.004

引言

罐区储罐数量多且密集,油品储存量大,其间各种输油管道又错综复杂,由于汽油易燃、易爆且有毒,一旦发生泄漏,轻则造成资源浪费,重则可能引起火灾、爆炸、中毒等事故,甚至升级为后果更严重的多米诺效应^[1]。可燃气体探测器作为重要的保护层,其自动报警功能可迅速确定泄漏位置,提示工作人员采取一系列措施来预防事故或防止事故升级^[2]。然而目前可燃气体探测器的设置一般按照相关标准规定或工作经验进行布置^[3],设置方法过于主观,导致检测效果较差^[4]。可燃气体探测器的布置应符合气体扩散规律,而风向、风速、温度等外部环境条件以及罐区设备的阻挡,使得气体泄漏扩散过程较为复杂^[5],因此,基于计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 模拟气体泄漏扩散后果以确定探测器位置的方法逐渐得到广泛

应用^[6]。

Kelsey 等^[7]通过对海上高压气体泄漏扩散进行 CFD 模拟,以 5 m 为间隔设置监测点记录可燃气体实时气体浓度,进而研究了气云大小、安装位置高低、探测器类型、响应时间等因素对可燃气体探测器系统灵敏度的影响。DeFriend 等^[8]通过 CFD 模拟特定泄漏造成不可接受风险的气云大小,从而确定了可燃气体探测器的安全间距。章博等^[9]以某高含硫气田集气站天然气泄漏为例构建 CFD 模型,根据监测点记录的气体实时浓度信息对探测器布置位置、报警时间等进行分析,结果表明可燃气体探测器高位布置比低位布置的灵敏性更高。Seo 等^[10]根据 Quantitative Risk Analysis (QRA) 报告中包含的 8 个随机变量生成泄漏场景,采用抽样方法筛选出代表性场景,再利用 CFD 描述气体泄漏扩散随时间的变化过程,最后通过计算探测器风险指数确定了气体探测器的最优位置。王彬^[11]基于 ISA84 的 MOON 投票安排方法,在下风向以 15 m 为间隔设置监测点,再通过 FLACS 软件模拟液化天然气的泄漏扩散,结合报警上下限及响应时间 (30 s 内),得到可燃气体探测器的优化布局。姜春雨^[12]采用 FLACS 模拟

收稿日期: 2021-08-29

基金项目: 国家自然科学基金 (52174062)

第一作者: 女, 1995 年生, 硕士, 助理工程师

E-mail: 825684765@qq.com

H₂S 的泄漏扩散,分析不同泄漏高度、泄漏方向的 H₂S 浓度分布,确定了气体检测器设置的水平距离和高度位置,并对现有设计规范提出了改进意见。

本文针对某罐区的现场调研情况,结合现场风速、风向、温度等条件确定泄漏场景;然后采用 FLACS 软件建立实际尺寸的罐区三维动态 CFD 模型,根据 GB/T 50493—2019 设置候选监测点;通过模拟计算获得汽油泄漏扩散过程中监测点记录的实时气体浓度信息,确定有效监测点及其检测时间,对现场可燃气体探测器的设置进行了评估。

1 罐区概况

某罐区有 8 座 10 000 m³ 的储罐,主要储存汽油和柴油,储罐基本信息见表 1。该罐区 2019 年储油罐的声发射检测报告显示,G31204 储罐罐底板综合评定为Ⅱ级,同年,根据现场调研,发现 G31204 储罐有明显腐蚀现象,且有沉降趋势。纵观 G31201 ~ G31208 储罐从投产至今的状况,G31204 储罐改造内容多,腐蚀和沉降情况较严重,因此,以 G31204 储罐为研究对象,选择该储罐所在防火堤内的区域进行研究。

表 1 储罐基本信息

Table 1 Basic information for the storage tank

序号	工艺编号	投用时间	型号及规格	罐体高度/m	罐体内径/m	介质
1	G31201	2002.9	内浮顶 10 000 m ³	14.672	30	柴油
2	G31202	2002.9	内浮顶 10 000 m ³	14.672	30	柴油
3	G31203	2002.9	内浮顶 10 000 m ³	14.672	30	柴油
4	G31204	2002.9	内浮顶 10 000 m ³	15.475	30	汽油
5	G31205	2002.9	内浮顶 10 000 m ³	15.475	30	汽油
6	G31206	2002.9	内浮顶 10 000 m ³	15.475	30	汽油
7	G31207	2002.9	内浮顶 10 000 m ³	15.475	30	汽油
8	G31208	2002.9	内浮顶 10 000 m ³	15.475	30	汽油

2 模型的建立

2.1 几何模型

通过 FLACS 在 CASD 模块中应用组合和差集命令,建立罐区等比例三维模型。本文以 G31204 储罐所在防火堤内区域为研究对象,该防火堤内包含 G31203、G31204 两个储罐,由于罐区内各设备间的连接管线复杂且细密,会增加建模和计算难度,

因此,以能够代表罐区典型储罐实体为目标,综合考虑罐区形状以及计算机资源等条件限制,对部分结构进行相应的简化,几何模型见图 1。

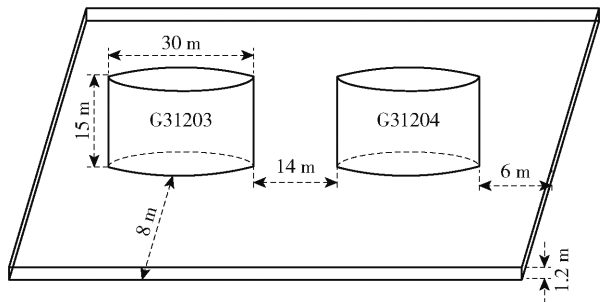


图 1 罐区几何模型

Fig. 1 Geometric model of the tank farm

当储罐发生泄漏时,汽油以液态形式从罐底板泄漏,由于其易扩散和易流淌性,会在地面迅速向四周扩展形成液池;同时,汽油吸收太阳辐射、环境风和地面带来的热量,不断挥发形成易燃易爆油蒸气。FLACS 采用 pool 模型计算汽油连续泄漏造成的液池扩展和重气扩散两个过程。

1) 液池扩展

质量守恒

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu_i}{\partial x_i} = \frac{\dot{m}_L - \dot{m}_V}{\rho_1} \quad (1)$$

式中, h 为液池平均厚度,m; t 为泄漏时间,s; u_i 为液池在 i 方向的扩展速度,m/s; x_i 为液池在 i 方向的扩展距离,m; \dot{m}_L 为汽油泄漏速率,kg/(m²·s); \dot{m}_V 为汽油蒸发速率,kg/(m²·s); ρ_1 为汽油密度,kg/m³。

动量守恒

$$\frac{\partial hu_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial hu_i}{\partial x_i} = F_{g,i} + F_{\tau,i} \quad (2)$$

式中, $F_{g,i}$ 为重力项, $F_{g,i} = hg\Delta \frac{\partial(h+z)}{\partial x_i}$,其中 g 为重力加速度,m/s², z 为距离地面的高度,m, Δ 为流淌面介质参数,液池在地面上扩展取其值为 1; $F_{\tau,i}$ 为液池与地面间的剪切应力, $F_{\tau,i} = \frac{1}{8}f_i u_i |u_i|$,其中 f_i 为摩擦因子。

比焓传递方程为

$$\frac{\partial h\theta}{\partial t} + u_i \frac{\partial h\theta}{\partial x_i} = \frac{\dot{m}_L}{\rho_1}(\theta_L - \theta) + \frac{1}{\rho_1}(\dot{q}_c + \dot{q}_{rad} + \dot{q}_g + \dot{q}_{evap}) \quad (3)$$

式中, θ 为液池的比焓,J/kg; θ_L 为汽油的比焓,

J/kg ; \dot{q}_c 为液池与空气之间的热对流; \dot{q}_{rad} 为太阳和周围环境中的热辐射; \dot{q}_g 为液池与地面间的热传递; \dot{q}_{evap} 为维持蒸发消耗的热量^[13]。

2) 重气扩散

汽油泄漏挥发形成的油蒸气在大气湍流的作用下沿下风向扩散, 主要受质量、动量和能量守恒等方程的控制。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial(\beta_v \rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_j \rho u_j)}{\partial x_j} = \frac{\dot{m}}{V} \quad (4)$$

式中, β_v 为体积孔隙率; β_j 为 j 方向的孔隙率; u_j 为气云在 j 方向的速度分量, m/s ; x_j 为气云在 j 方向的扩散距离, m ; ρ 为气云密度, kg/m^3 ; \dot{m} 为质量流量, kg/s ; V 为体积, m^3 。

动量守恒方程为

$$\frac{\partial(\beta_v \rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_j \rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\beta_v \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\beta_j \sigma_{ij}) + F_{o,i} + F_{w,i} + \beta_v (\rho - \rho_0) g_i \quad (5)$$

式中, σ_{ij} 为应力张量, N/m^2 ; p 为压力, Pa ; $F_{o,i}$ 、 $F_{w,i}$ 为流动阻力, N ; ρ_0 为空气密度, kg/m^3 ; g_i 为 i 方向的重力加速度分量, m/s^2 。

能量守恒方程为

$$\frac{\partial(\beta_v \rho H)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_j \rho u_j H)}{\partial x_j} = \beta_v \frac{Dp}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\beta_j \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_h} \frac{\partial H}{\partial x_j} \right) + \frac{\dot{Q}}{V} \quad (6)$$

式中, H 为比焓, J/kg ; Dp/Dt 为压力的随体导数, 表示压力随时间的变化率; μ_{eff} 为有效黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; \dot{Q} 为热流率, J/s ; $\sigma_h = 0.7$ 。

混合组分方程为

$$\frac{\partial(\beta_v \rho \xi)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_j \rho u_j \xi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\beta_j \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\xi} \frac{\partial \xi}{\partial x_j} \right) \quad (7)$$

式中, ξ 为混合分数; $\sigma_\xi = 0.7$ 。

湍动能 κ 方程为

$$\frac{\partial(\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \kappa)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + G_\kappa - \rho \varepsilon \quad (8)$$

式中, κ 为湍流动能, m^2/s^2 ; $\sigma_\kappa = 1$; G_κ 为阻力影响因素; ε 为湍动能耗散率。

耗散率 ε 方程为

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_{\varepsilon 1} G_\kappa - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (9)$$

式中, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

汽油泄漏导致的液池、油蒸气两相扩散过程极其复杂, 为了简化计算和分析, 假设环境压力恒定为 $101\,325\text{ Pa}$; 泄漏速率保持恒定; 泄漏扩散过程中, 气云温度与环境温度相同, 不会发生热量和能量的变化; 计算区域内不存在与汽油挥发形成的可燃气体发生化学反应的物质。

根据该罐区的现场条件, 设置温度为 $27.5\text{ }^\circ\text{C}$, 风向为西北风 (NW), 风速为 1.4 m/s , 地面粗糙度为 0.005 m , 大气稳定度为 F, 太阳辐射通量为 400 W/m^2 。根据现场调研的 G31204 储罐的易泄漏位置设置液池中心为 $(78\text{ m}, 10\text{ m}, 20\text{ m})$, 泄漏量为 20 kg/s , 模拟时间设为 200 s 。为确保整个过程不会点燃, 点燃时间设置为 $999\,999\text{ s}$ 。

本课题组在前期研究中借助了文献[14]中的储油罐泄漏扩散实验对汽油储罐泄漏液池扩散模型进行验证, 结果发现两者变化趋势一致, 误差为 6.76% , 表明该模型具有一定的可靠性^[15]。

2.2 网格划分

网格划分对仿真结果的精确性与可靠性有重要影响, 需要综合考虑计算精度、工程计算量以及计算机性能等因素。网格的搭建在 FLACS 中的 grid 模块进行, 防火堤内的区域为核心区域, 大小为 $86\text{ m} \times 46\text{ m} \times 15\text{ m}$, 网格间距设置为 1, 为保证防火堤能被识别, 要求防火堤的厚度不小于 0.5 CV (控制体积) 厚度。由于模拟过程中需要考虑到风的影响, 为减小边界条件对模拟的影响, 网格区域需适当加大, 计算域在核心域的基础上向外扩展为 $200\text{ m} \times 150\text{ m} \times 30\text{ m}$ ^[16]。为保证结果的准确性, 需要对液池中心的网格进行密集型优化, 在泄漏位置处做局部加密处理, 并使用 smooth 功能对密集网格及其周围粗网格进行平稳过渡处理, 保证相邻控制体积厚度递差不大于 30% 。网格信息见图 2, 模型总网格数量为 $518\,568$, 网格模型如图 3 所示。在本课题组前期的研究中, 分别使用了网格大小为 0.5 和 1 的网格模型进行网格无关性验证, 结果表明两种尺寸的计算结果差距很小^[15], 因此该网格具有较好的独立性。将核心区域网格大小设为 1, 既能提高计算速度, 又能保证计算精度。

2.3 候选监测点

在 GB/T 50493—2019《石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准》中规定: 可燃气体探测

Total no. of control volumes defined: 518 568			
	(X)	(Y)	(Z)
No. of control volumes:	124	82	51
Min. contr. vol. sizes:	0.50	0.50	0.10
Max. contr. vol. sizes:	10.87	9.39	1.94
Max. percentage diff.:	29.17	28.10	13.53
occurred at indices:	104	25	12
Max aspect ratio:	108.73		
(longest control volume side divided by shortest)			

图2 网格信息

Fig.2 Grid information

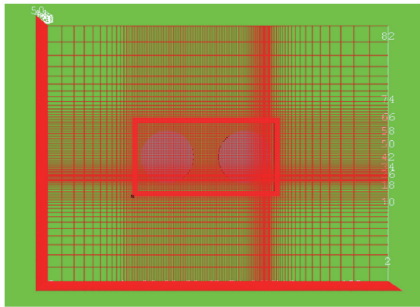


图3 网格模型

Fig.3 Grid model

器距其所覆盖范围内的任一释放源的水平距离不宜大于 10 m;检测比空气重的可燃气体,探测器安装高度应距地坪 0.3 ~ 0.6 m^[17]。因此,候选监测点的布局如图 4 所示,其与液池中心的距离如表 2 所示,并且在同一点位的 4 个不同高度上(距地面 0.3、0.4、0.5、0.6 m)分别布置监测点,共设 52 个候选监测点。

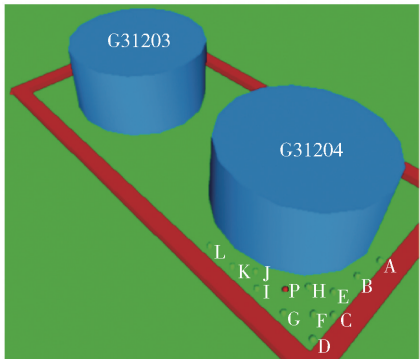


图4 候选监测点布局

Fig.4 Layout of candidate monitoring points

3 可燃气体探测器设置评估

汽油的爆炸下限(lower explosion limit, LEL)为 1.1%,爆炸上限(upper explosion limit, UEL)为 5.9%,本文用戊烷代替汽油进行模拟,其爆炸下限

表2 候选监测点位置

Table 2 Location of candidate monitoring points

候选监测点	距液池中心的	候选监测点	距液池中心的
	距离/m		距离/m
A	13.6	H	1.4
B	9	I	7.8
C	4	J	8.5
D	6.4	K	12
E	3.6	L	16.8
F	2.8	P	3.6
G	5	—	—

为 1.4%,爆炸上限为 7.8%。根据可燃气体探测器选址需求设定临界气体浓度值作为探测器成功检测的标志。可燃气体探测器报警设定值分为一级报警和二级报警,一级报警值为高限报警,是警示性报警,二级报警值为高高限报警,一旦发生须立即处理。GB/T 50493—2019 规定可燃气体探测器的一级报警设定值应小于或等于 25% LEL,二级报警设定值应小于或等于 50% LEL。同时,可燃气体探测器报警值低于 20% LEL 会导致过多的干扰报警^[18]。考虑到安全性,设定一级报警值为 20% LEL (0.002 8),二级报警值为 50% LEL (0.007 0),可燃气体的危险范围(FMOLE)为 0.002 8 ~ 0.078 m³/m³。气体探测器响应时间是指从探测器接触被测气体至达到稳定指示值所用的时间,一般为达到稳定指示值 90% 时的时间,GB/T 12358—2006 规定可燃气体探测器响应时间在 30 s 以内^[19]。

汽油泄漏挥发形成的油蒸气在大气湍流的作用下与空气混合形成可燃气体,随着可燃气云的形成与扩大逐渐构成一个危险但不可见的三维空间。图 5 ~ 7 分别为风场矢量、风场流线以及可燃气云扩散的三维结果。可以看出,由于储罐的阻挡作用,气流在储罐的背风侧出现漩涡及逆风回流现象,导致储罐背风侧风速低,流场紊乱^[20]。从图 7 可以看出在风的影响下,可燃气体主要沿泄漏位置的西北方向扩散,当扩散至防火堤后被其阻挡,气云沿防火堤扩散。

在 30 s 内被可燃气云覆盖的候选监测点即为有效监测点。从图 8 可以看出,仅 B、E、F、H、J、P 位置处的监测点能成功检测到可燃气体,它们分别距泄漏源 9、3.6、2.8、1.4、8.5、3.6 m,有效监测点报警时间见表 3。可以看出,除 J1 的二级报警时间在

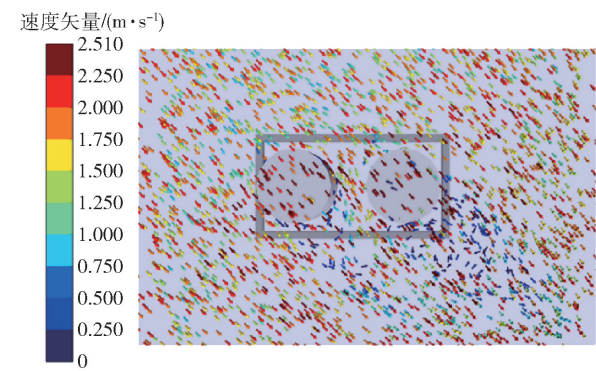


图 5 风场矢量图

Fig.5 Vector diagram of the wind field

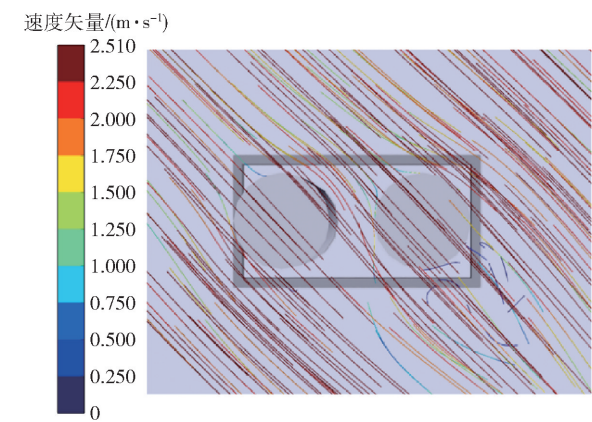


图 6 风场流线图

Fig. 6 Streamline diagram of the wind farm

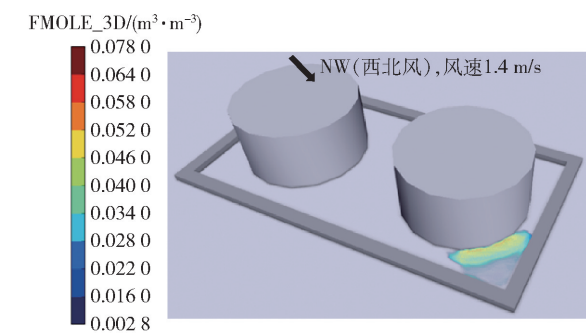


图 7 可燃气云扩散三维图

Fig. 7 Three dimensional diagram of combustible gas cloud diffusion

30 s 内,其余有效监测点的二级报警时间均超出 30 s,因此为提高可燃气体探测器的灵敏度,可适当降低报警阈值。

考虑到气云扩散的对称性,选择 B、E、F、H 处的有效监测点分别绘制水平方向和垂直方向的可燃气体浓度时程曲线,如图 9、10 所示。结合图 8 和图 9

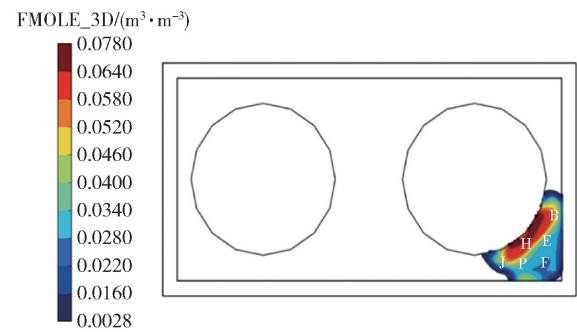


图 8 30 s 时可燃气云浓度分布

Fig. 8 Concentration distribution of the combustible gas cloud at 30 s

表 3 有效监测点报警时间

Table 3 Effective monitoring point alarm times

监测点编号	坐标位置/m	距泄漏源	一级报警	二级报警
		距离/m	时间/s	时间/s
B1	(81,18,0.3)		23.38	34.85
B	B2 (81,18,0.4)	9	24.82	38.86
	B3 (81,18,0.5)		27.65	45.26
E	E1 (80,13,0.3)	3.6	24.59	47.01
F	F1 (80,8,0.3)	2.8	28.95	69.19
H	H1 (77,11,0.3)	1.4	17.19	57.26
J	J1 (70,7,0.3)		23.59	25.48
	J2 (70,7,0.4)	8.5	24.64	44.32
	J3 (70,7,0.5)		27.79	45.32
P	P1 (75,8,0.3)	3.6	26.46	47.89

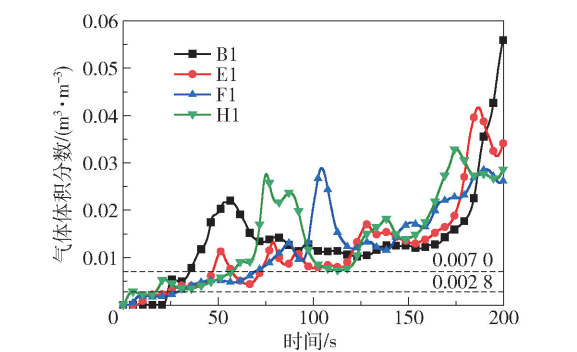


图 9 水平方向有效监测点记录的浓度时程曲线

Fig.9 Concentration time history curves recorded at the effective monitoring points in the horizontal direction

分析监测点安装的水平距离：GB/T 50493—2019 规定可燃气体探测器应设置在任一泄漏源的 10 m 范围内,距泄漏源 13.6 m 的监测点 A、距泄漏源

12 m 的监测点 K 和距泄漏源 16.8 m 的监测点 L 无法检测到可燃气体是合理的,但距泄漏源 4 m 的监测点 C、距泄漏源 6.4 m 的监测点 D、距泄漏源 5 m 的监测点 G 和距泄漏源 7.8 m 的监测点 I 也不能检测到可燃气体,因此说明标准中的规定不完善;从表 3 可知,在同一高度(监测点距地面 0.3 m),距泄漏源下风向 1.4 m 处的监测点 H1 响应时间最短(17.19 s),其余依次为距泄漏源 9 m 处的监测点 B1(23.38 s),距泄漏源 3.6 m 处的监测点 E1(24.59 s),距泄漏源 2.8 m 处的监测点 F1(28.95 s)。因此,可燃气体探测器的安装位置并不仅仅是距泄漏源越近就能探测到可燃气体,或者响应时间最短,其设置应遵循可燃气体的扩散规律。从图 5~7 可以看出,在该场景下,气云在水平方向的扩散主要受风向和防火堤的影响。

根据模拟结果分析监测点安装高度:GB/T 50493—2019 规定检测比空气重的可燃气体时,探测器安装高度宜距地坪或楼地板 0.3~0.6 m,而在 30 s 内, E、F、H、P 处只有 0.3 m 高度的监测点才能检测到可燃气体, B、J 处 0.3~0.5 m 高度范围内能检测到可燃气体;从图 10 中可以看出,同一水平位置的监测点,高度越低报警时间越短。因此,在符合标准要求的安装高度范围内,可燃气体探测器设置高度越低,越有利于探测器迅速检测到可燃气体。建议可燃气体探测器的最佳设置高度为 0.3 m。

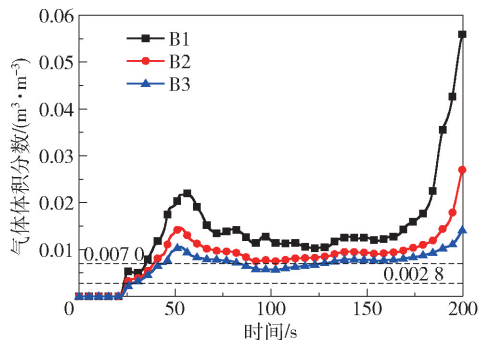


图 10 垂直方向有效监测点记录的浓度时程曲线

Fig. 10 Concentration time history curves recorded at the effective monitoring points in the vertical direction

该罐区危险源 G31204 储罐周围现场设置的可燃气体探测器与模型中监测点 H4 位置相同,根据模拟结果可知,现场探测器的水平位置设置合理,但

高度不合理,应调整至距地面 0.3 m 处。此外, G31204 储罐附近只有 1 个监测点,考虑到探测器失效、误报警等情况,建议在其附近增设可燃气体探测器。

4 结论

本文利用 FLACS 软件建立某罐区汽油储罐泄漏扩散 CFD 模型,根据现行最新标准 GB/T 50493—2019 在泄漏源周围设置候选监测点,并根据监测点记录的实时气体浓度信息判断其是否能在 30 s 内达到报警阈值,以此对可燃气体探测器的设置位置进行评估。结果表明:关于监测点安装的水平距离,部分距泄漏源 10 m 范围内的监测点并不能检测到可燃气体,其设置应遵循可燃气体的扩散规律;关于监测点的安装高度,同一水平位置的监测点,其高度越低报警越快,因此建议可燃气体探测器的最佳设置高度为 0.3 m。

参考文献:

- [1] WANG Z R, JIAO F, CAO X Y, et al. Mechanisms of vapor cloud explosion and its chain reaction induced by an explosion venting flame[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 141: 18–27.
- [2] 陈南. 石化轻质油储罐区泄漏监测及消防监控系统应用设计[C]//火灾科学与消防工程国际学术会议. 北京, 2003: 556–560.
CHEN N. The application design of leakage detecting and fire protection monitoring systems in petrochemical light-weight oil tank zone[C]// International Symposium on Fire Science and Fire-Protection Engineering. Beijing, 2003: 556–560. (in Chinese)
- [3] CEN K, YAO T, WANG Q S, et al. A risk-based methodology for the optimal placement of hazardous gas detectors[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2018, 26(5): 1078–1086.
- [4] ZHOU C C, ZHANG B, QIAO S, et al. A stochastic programming approach for the optimization of gas detector placement in offshore platforms[J]. Ocean Engineering, 2019, 187: 106223.
- [5] BENAVIDES-SERRANO A J, MANNAN M S, LAIRD C D. A quantitative assessment on the placement practices of gas detectors in the process industries[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 35: 339–351.

- [6] VÁZQUEZ-ROMÁN R, DÍAZ-OVALLE C, QUIROZ-PÉREZ E, et al. A CFD-based approach for gas detectors allocation [J]. *Journal of Loss Prevencion in the Process Industries*, 2016, 44: 633–641.
- [7] KELSEY A, IVINGS M J, HEMINGWAY M A, et al. Sensitivity studies of offshore gas detector networks based on experimental simulations of high pressure gas releases [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2005, 83: 262–269.
- [8] DEFRIEND S, DEJMEK M, PORTER L, et al. A risk-based approach to flammable gas detector spacing [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 159(1): 142–151.
- [9] 章博, 陈国明, 龚金海, 等. 基于计算流体力学的集气站气体检测报警仪布置优化[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2010, 34(5): 141–146.
ZHANG B, CHEN G M, GONG J H, et al. Optimization of gas detection and alarm instrument networks at gas gathering station based on CFD [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2010, 34(5): 141–146. (in Chinese)
- [10] SEO J K, KIM D C, HA Y C, et al. A methodology for determining efficient gas detector locations on offshore installations [J]. *Ships and Offshore Structures*, 2013, 8(5): 524–535.
- [11] 王彬. 大型 LNG 储罐泄漏事故重气扩散行为模拟及监测点布局优化研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2014.
WANG B. Research on heavy gas dispersal behaviors of large LNG tank leakage accident and layout optimization of detectors [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014. (in Chinese)
- [12] 姜春雨. 重质油加工过程中硫化氢中毒风险及检测器布置研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
JIANG C Y. Study on hydrogen sulfide poisoning risk and gas detection instrument networks in heavy oil processing [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017. (in Chinese)
- [13] 徐大用, 蒋会春, 姜威, 等. 基于 FLACS 的汽油槽车运输泄漏爆炸事故数值模拟研究[J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2019, 31(4): 16–25.
XU D Y, JIANG H C, JIANG W, et al. CFD simulation of gasoline tanker transportation explosion using FLACS [J]. *Journal of Changzhou University(Natural Science Edition)*, 2019, 31(4): 16–25. (in Chinese)
- [14] LIU F J, ZHAO L W, QIAN Y D. A study on leakage diffusion of double-layer structure of oil storage tank [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 220–223: 487–493.
- [15] 文静. 汽油储罐泄漏扩散过程三维动态模拟研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2020.
WEN J. Three dimensional dynamic simulation of leakage diffusion process in gasoline storage tank [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2020. (in Chinese)
- [16] 王玉秀. 天然气生产碳氢处理工艺可燃气探测器优化布置研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
WANG Y X. Research on optimized layout of flammable gas detectors of hydrocarbon process in gas production process [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017. (in Chinese)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准: GB/T 50493—2019 [S]. 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for design of combustible gas and toxic gas detection and alarm for petrochemical industry: GB/T 50493—2019 [S]. 2019. (in Chinese)
- [18] American Petroleum Institute. Recommended practice for analysis, design, installation, and testing of basic surface safety systems for offshore production platforms: API RP 14C—2001 [S]. Washington, D. C. : API Publishing Services, 2001.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 作业场所环境气体检测报警仪通用技术要求: GB 12358—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Gas monitors and alarms for workplace—general technical requirements: GB 12358—2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese)
- [20] 杨兆晶, 侯磊, 朱森. 某大型 LNG 储罐泄漏扩散及其影响因素研究[J]. *天然气与石油*, 2020, 38(1): 47–53.
YANG Z J, HOU L, ZHU M. Research on leakage and diffusion of a large LNG storage tank and its influencing factors[J]. *Natural Gas and Oil*, 2020, 38(1): 47–53. (in Chinese)

Flow field analysis of combustible gas leakage in gasoline storage tank based on FLACS

WANG Xu¹ LIAO KeXi² ZHANG ZhiJian³ ZENG ZhaoXiong³ WANG SiHan¹ XIANG SuLin¹

(1. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang 065000; 2. Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500; 3. PipeChina Southwest Pipeline Company, Chengdu 610036, China)

Abstract: The tank farms store a large volume of oil products, and have a high risk of leakage. Once a storage tank leaks, the combustible gas is prone to fire, explosion and other accidents when encountering a fire source and this can even trigger a more serious domino effect. A combustible gas detector is an important safety device since it continuously monitors the site and provides early warning of danger. In this work, taking a gasoline tank leakage as an example, a CFD model of gasoline tank leakage diffusion was established using FLACS software, and the candidate monitoring points were set by the latest current standard GB/T 50493—2019. The results showed that some monitoring points within 10 m from the leak source could not detect combustible gas, and the setting of the detector should follow the law of combustible gas diffusion. To detect combustible gases heavier than air, it is recommended that the optimal installation height of the detector is 0.3 m.

Key words: combustible gas detector; FLACS; gasoline storage tank; leakage diffusion

(责任编辑:吴万玲)