



DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2021.06.30.02

文章编号: 1674-5086(2022)02-0135-13

中图分类号: TE22

文献标志码: A

天然气管道站场泄漏扩散三维动态研究

尹恒^{1*}, 邹庆², 廖柯熹², 彭善碧²

1. 国家管网集团西气东输公司武汉计量研究中心, 湖北 武汉 430000

2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室·西南石油大学, 四川 成都 610500

摘要: 针对天然气管道站场中天然气的泄漏扩散对安全生产造成的问题, 开展了天然气管道站场中天然气泄漏扩散规律研究。采用专业软件模拟的方法, 使用 FLACS 进行模拟, 设置边界条件进行求解, 研究不同风速、不同风向及不同泄漏速率对天然气泄漏扩散的影响, 并结合天然气行业相关标准对天然气管道站场内可燃性气体位置进行优化。研究结果表明, 泄漏速率越大、风速越小时, 站场区域内可燃气体体积越大, 可燃气体扩散范围越广, 危险程度越高, 同时, 顺风向泄漏的危害程度要小于其他方向。基于计算结果建议收发球筒区的可燃气体探测器应设置在距离收球筒 1 m 处, 高度设置为 2 m。这一研究为天然气管道站场的安全运行提供了重要理论支撑。

关键词: 天然气管道站场; 泄漏; 可燃性气体; 探测; 扩散

Three-dimensional Dynamic Study on Leakage and Diffusion of Natural Gas Pipeline Station

YIN Heng^{1*}, ZOU Qing², LIAO Kexi², PENG Shanbi²

1. Wuhan Metrology Research Center, Pipe China West East Gas Pipeline Company, Wuhan, Hubei 430000, China

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

Abstract: In view of the problems caused by the leakage and diffusion of natural gas in natural gas pipeline yards on safe production, a study on the law of natural gas leakage and diffusion in natural gas pipeline yards is carried out. We adopt professional software simulation method, use FLACS software to model, set boundary conditions to solve, study the influence of different wind speeds, different wind directions and different leakage rates on natural gas leakage and diffusion, and combine the relevant standards of the natural gas industry on the combustibility of natural gas pipeline stations in optimizing the position of flammable gas. The research results show that the greater the leakage rate and the lower the wind speed, the larger the volume of combustible gas in the station area, the wider the spread of combustible gas cloud, and the higher the degree of danger. At the same time, the hazard degree of downwind leakage is less than that of other directions. It is recommended that the flammable gas detector in the receiving and dispatching tube area should be set at 1 m away from the receiving tube, and the height should be set at 2 m. This research provides important theoretical support for the safe operation of natural gas pipeline stations.

Keywords: natural gas pipeline station; leakage; flammable gas; detect; diffusion

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1718.TE.20220321.1514.010.html>

尹恒, 邹庆, 廖柯熹, 等. 天然气管道站场泄漏扩散三维动态研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 135-147.

YIN Heng, ZOU Qing, LIAO Kexi, et al. Three-dimensional Dynamic Study on Leakage and Diffusion of Natural Gas Pipeline Station[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2022, 44(2): 135-147.

* 收稿日期: 2021-06-30 网络出版时间: 2022-03-23

通信作者: 尹恒, E-mail: smartyin@qq.com

引言

天然气管道站场是输送天然气的重要场所。由于站场内处理设备布局复杂、管道众多,处理介质为天然气,易燃易爆、有毒有害,且操作复杂,极易引发可燃气体和有毒气体泄漏事故,轻则造成资源浪费,情况严重时可能引起火灾、爆炸、中毒等事故,导致惨重的人员伤亡、巨大的经济损失以及不良的社会影响^[1-3]。

目前,可燃及有毒气体泄漏检测仪的设置方法主要由相关标准进行规定,石化企业各类天然气站场以及可燃、有毒气体作业储存场所均依据这些标准规定进行气体检测仪的设置^[4-5]。

章博^[6]对高含硫天然气集气站的泄漏检测报警系统进行了优化设置。Berry 等^[7-8]针对市政水管网在受到污染情况下如何优化布置水质监测点的问题,建立混合整数规划问题(MIP),提出了系统整体的最优化数学模型。Legg 等^[9-11]在分析石化厂气体泄漏气体检测仪布置方法时,建立考虑多个泄漏位置、包含不同工艺单元的数值模型,考虑不同风向、风速等不确定因素的影响,使用软件模拟多个泄漏场景,通过建立目标函数和约束条件,提出了一系列系统整体优化布置的方案。吴梦雨^[12]针对成品油管道泄漏事故,讨论了管径大小、泄漏位置等因素对油品渗流扩散范围的影响。

李洋等^[13]利用 CFD 软件中多孔介质流动数值模拟方法研究了土壤孔隙率、土壤含水量、油品密度、油品黏度与泄漏油品纵向扩散深度的关系,研究表明,纵向扩散深度与土壤孔隙率、油品密度、油品黏度呈正相关,与土壤含水量呈负相关;并通过正交实验研究了四因素对其影响程度强弱,发现由强到弱为土壤含水率、土壤孔隙率、油品密度及油品黏度。

彭伟等^[14]建立了双泄漏孔的燃气管道模型,研究双泄漏孔间距对燃气泄漏和分布的影响,泄漏孔越大,气体在地下的分布面积越大,泄漏孔越大,对深埋气管泄漏的影响越大。顶部与侧壁的漏孔扩散速度几乎相同,底部漏孔扩散比例比前两个要低很多。双泄漏孔的距离越小,甲烷扩散越快。泄漏孔的形状对深埋输气管道的泄漏和分布影响不大。

张敬阳等^[15]利用 ICM 建立典型建筑物几何模型,研究住宅阳台燃气管道泄漏发生后的室内泄漏燃气扩散规律,以及建筑开窗条件对燃气扩散的

影响,发现在产生建筑内风场通路的开窗工况下,扩散形成的可燃气体聚集范围更小,此时室内形成的爆炸区域主要集中在厨房外侧的顶部。

周宁等^[16]为研究石化管廊管道气体的泄漏扩散规律,采用 CFD 软件对不同环境风速和泄漏初始速度下,石化管道丁烷气体泄漏的扩散规律进行了数值模拟研究。结果表明,无风状态下,丁烷泄漏气体以射流形式从泄漏口喷出,爆炸极限区域集中于泄漏口上方;随着环境风速的增大,丁烷气体高浓度区域面积缩小,处于爆炸极限范围区域的面积扩大,危险区域面积扩大,丁烷气体整体呈上浮趋势;丁烷气体泄漏初始速度越大,丁烷泄漏气体自由扩散的作用越强,处于爆炸极限范围区域的面积越大,丁烷气体沉降趋势明显、纵深增加。

李文英等^[17]利用美国热电子公司生产的 680HVM 型碳氢化合物气体分析仪两次对川西北气矿平丹输气管线上 4 个输气场站的设备进行泄漏检测,并用美国 ENVIROMETRICS 软件公司的 FEMS (fugitive emissions management system) 泄漏管理软件对所测数据进行处理,得出了所需要的天然气泄漏量的有关数据(即天然气泄漏量、泄漏点、泄漏点汇总及泄漏率报告等)。

胡忆洵^[18]分析了天然气管道产品泄漏的原因,介绍了在不影响正常运行的情况下消除泄漏的动密封技术,并讨论了法兰泄漏、直管泄漏、三通泄漏及天然气输送管道泄漏的具体消除方法。

刘恩斌等^[19]研究了一种新型的基于瞬态模型的管道泄漏检测方法,并对传统的特征线法差分格式进行了改进,求解结果表明该方法不仅大大减少了仿真过程中由启动到稳定所经历的时间,提高了仿真系统的适应性,而且求解速度快,同时还能够满足实时仿真的要求,能够对管道的泄漏做出及时准确的报警,定位误差在被测管长的 1% 以内。

张文艳等^[20]通过研究风速与风压的关系,确定了风速分布的规律;考虑管道出流的扩散特性、管道出流的射流效应和膨胀效应,以及重力对地表的影响,主要考虑水平风速的影响计算公式。

马梅等^[21]采用理论分析和数值模拟的方法,对管道泄漏后在土壤和空气环境中连续扩散的问题进行研究,结果表明,空气区域中甲烷体积分数随时间的变化分为快速增长、缓慢增长和稳定 3 个阶段,泄漏发生 60 min 后隧道顶部 6 m 长的区域处于爆

炸极限浓度范围内。侯永亮等^[22]通过 FLUENT 软件进行泄漏扩散模拟, 结果发现强风向作用下泄漏气体的影响范围较小、影响的设备也较少。部分学者同时也研究了泄漏扩散的相关机理^[23-24]。

综上所述, 环境风速、风向及泄漏速率对天然气扩散影响较大, 但目前相关研究集中在理论研究上, 对现场生产实际应用较少。因此, 本文建立天然气站场模型, 研究不同风速、不同风向及不同泄漏速率对天然气扩散的影响。从提高检测有效性入手提出适合于天然气管道站场的更有效的可燃性气体检测仪设置建议。

1 模型建立及求解方法

1.1 数学模型

发生天然气泄漏事故后, 比空气轻的天然气

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial j} = -\frac{\partial p}{\partial i} + \frac{\partial}{\partial j} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial j} \right) + \frac{\partial}{\partial j} \left(\mu_t \frac{\partial u_j}{\partial i} \right) + (\rho - \rho_a) g_i \quad (2)$$

式中: p —绝对压力, Pa;

μ_t —流体的湍流黏度, Pa·s;

ρ_a —空气密度, kg/m³;

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j T)}{\partial j} = \frac{\partial}{\partial j} \left(\frac{u_t}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial j} \right) + \frac{c_{pv} - c_{pa}}{c_p} \left[\left(\frac{u_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial w}{\partial j} \right] \frac{\partial T}{\partial j} \quad (3)$$

式中: T —流体的温度, K;

u_t —该温度下的速度, m/s;

σ_T —湍流普朗特数, 无因次;

c_{pv} —泄漏物质的定压比热, J/(kg·K);

c_{pa} —空气的定压比热, J/(kg·K);

c_p —混合流体的定压比热, J/(kg·K);

σ_c —湍流施密特数, 无因次;

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial j} - \frac{\partial}{\partial j} \left[\frac{\rho u_{\text{eff}}}{\sigma_T} \frac{\partial}{\partial j} (k) \right] = G - \rho \varepsilon \quad (5)$$

湍流动能耗散率方程

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial j} - \frac{\partial}{\partial j} \left[\frac{\rho u_{\text{eff}}}{\sigma_c} \frac{\partial}{\partial j} (\varepsilon) \right] = \frac{\varepsilon}{C_3} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon) \quad (6)$$

式中:

k —湍流动能, J;

u_{eff} —有效黏度, mPa·s;

G —层流速度梯度产生的湍流动能, J;

ε —湍流动能耗散率, 无因次;

C_1, C_2, C_3 —无因次常数。

由于模型计算复杂, 因此, 为了简化计算及分

析, 做出如下假设: 模拟过程中, 环境压力为大气压力恒定不变, 泄漏速率保持恒定, 温度保持恒定, 不考虑化学反应。

会迅速扩散至整个天然气管道站场, FLACS 采用 Dispersion 模块计算天然气的泄漏扩散过程, 模型的计算方程主要包括 3 大控制方程(质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程)、组分控制方程以及湍流方程(湍流动能方程和湍流动能耗散率方程)。

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial j} = 0 \quad (1)$$

式中:

ρ —混合物的密度, kg/m³;

t —时间, s;

u_j —3 个方向的速度分量, m/s, $j=x, y, z$ 。

动量守恒方程

g_i —3 个方向的重力加速度分量, m/s², $i=x, y, z$ 。

能量守恒方程

w —组分的质量分数, 无因次。

混合组分方程

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j w)}{\partial j} = \frac{\partial}{\partial j} \left(\rho D_i \frac{\partial w}{\partial j} \right) \quad (4)$$

式中: D_i —流体的湍流扩散系数, m/s²。

湍流动能方程

析, 做出如下假设: 模拟过程中, 环境压力为大气压力恒定不变, 泄漏速率保持恒定, 温度保持恒定, 不考虑化学反应。

1.2 物理模型

本文结合川气东送的调研数据, 以其设备布局、尺寸数据为依据, 建立站场的简化三维模型, 该站场东西长 70.0 m, 南北长 108.9 m, 分别沿东西、南北方向建立 X 轴、 Y 轴, 竖直方向建立 Z 轴。站

内分为收发球筒区、过滤分离区、调压区、计量区、自用气区以及办公区 6 大功能区, 简化模型忽略了站场内部的辅助设施和结构, 以站场内重点关注设备的外形结构和空间位置为建模目标, 模型包括收

发球筒、分离装置(旋风分离器和过滤分离器)、调压撬块、计量撬块、自用气撬块以及各设备之间主要的地上工艺管道和站内办公楼。站场简化的全尺寸几何模型如图 1 所示。

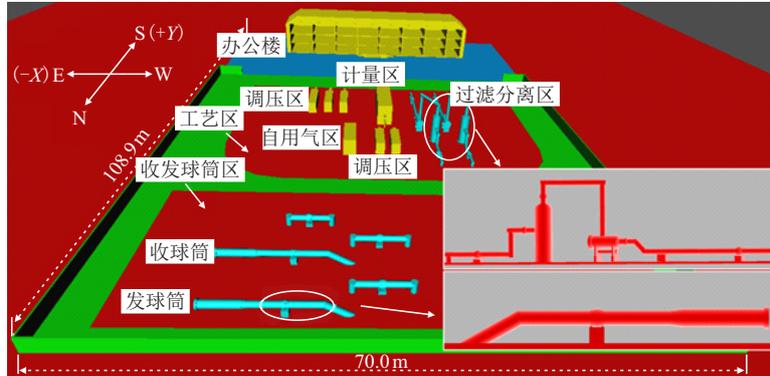


图 1 站场全尺寸三维实体模型
Fig. 1 Full-scale 3D solid model of the station yard

1.3 网格划分及边界条件

在 Grid 中进行网格搭建, 考虑风的影响, 网格区域需足够大以保证重点关注区域风速稳定, 故设置计算域为 $210\text{ m} \times 327\text{ m} \times 30\text{ m}$ 。因泄漏点处的浓度梯度较大, 为准确模拟泄漏孔附近天然气浓度的分布情况, 对泄漏孔附近的网格进行了细化, 并对整体进行网格无关性验证。FLACS 中普通网格尺寸对于网格数量具有重要影响, 本文设定细化网格尺寸为 0.25 m , 普通网格选用 $0.25, 0.50, 1.00, 1.25$ 与 1.50 m 等 5 种尺寸分别进行泄漏模拟, 结果如表 1 所示。通过对比, 普通网格尺寸 1 m 以内时模拟结果趋于稳定, 考虑到时间计算成本以及计算精度, 本文模拟时选用细化网格 0.25 m 、普通网格 1.00 m 的网格划分方法。

表 1 5 种不同网格下计算结果
Tab. 1 Calculation results under five different grids

网格尺寸/ m	网格数量	可燃气体峰值 体积/ m^3	误差/%
0.25	1 705 100	399.88	
0.50	1 315 800	410.74	2.72
1.00	936 800	422.19	2.79
1.25	764 200	463.99	9.90
1.50	508 000	524.31	13.21

泄漏场景下, 风流入流出边界设置为 Wind 条件, 其他边界设置为 Nozzle 条件。根据站场的环境统计数据, 站场温度、压力设置为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、 101.325 kPa 。为正确反映输气站场内部的风场情况, 设置 10 s 风场仿真计算, 待风场稳定后再进行

泄漏扩散模拟。

1.4 参数设置

1.4.1 可燃气体监测点设置

根据 GB 50493—2019《石油化工可燃气体和有毒气体检测报警技术规范》规定“探测器与周围设备之间距离不低于 0.5 m , 且检测比重小于空气的可燃气体的探测器, 其安装高度应高出释放源 $0.5\sim 2.0\text{ m}$ ”。本文研究的可燃气体为天然气, 主要成分为甲烷, 密度小于空气, 泄漏时容易向上方扩散, 结合工艺装置的高度, 在泄漏源上方设置 4 层监测点。布置监测点时考虑到模型的网格, FLACS 中要求监测点不能位于网格线上或壁面附近, 故本文每层监测点间隔 1 m , 两层监测点间隔 0.5 m , 最终确定监测点以 $8 \times 6 \times 4$ 对称布置, 其分布示意图见图 2, 以 0.5 m 高度为例, 部分监测点具体位置如表 2 所示。

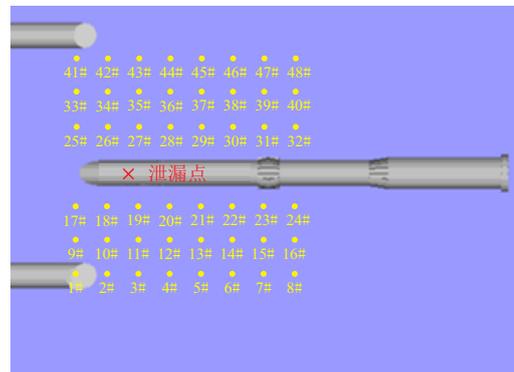


图 2 监测点分布示意图
Fig. 2 Schematic diagram of monitoring point distribution

表2 部分监测点位置

Tab. 2 Location of some monitoring points

编号	位置	编号	位置
1	(39.5, 93.0, 0.5)	13	(43.5, 94.0, 0.5)
2	(40.5, 93.0, 0.5)	14	(44.5, 94.0, 0.5)
3	(41.5, 93.0, 0.5)	15	(45.5, 94.0, 0.5)
4	(42.5, 93.0, 0.5)	16	(46.5, 94.0, 0.5)
5	(43.5, 93.0, 0.5)	17	(39.5, 95.0, 0.5)
6	(44.5, 93.0, 0.5)	18	(40.5, 95.0, 0.5)
7	(45.5, 93.0, 0.5)	19	(41.5, 95.0, 0.5)
8	(46.5, 93.0, 0.5)	20	(42.5, 95.0, 0.5)
9	(39.5, 94.0, 0.5)	21	(43.5, 95.0, 0.5)
10	(40.5, 94.0, 0.5)	22	(44.5, 95.0, 0.5)
11	(41.5, 94.0, 0.5)	23	(45.5, 95.0, 0.5)
12	(42.5, 94.0, 0.5)	24	(46.5, 95.0, 0.5)

1.4.2 监测选项设置

GB 50493—2019《石油化工可燃气体和有毒气体检测报警技术规范》规定“可燃气体的一级报警设定值应小于或等于25%LEL(爆炸下限),可燃气体的二级报警设定值应小于或等于50%LEL”。本文选择摩尔浓度作为监测点的输出选项,本文可燃气体由98.93%CH₄、0.22% C₂H₆以及0.85% CO₂组成,其爆炸下限为5.3%,爆炸上限为15.5%,因此,定义可燃气体危险浓度为0.013 25~0.155 00。同时,GB 15322—2019《可燃气体探测器》规定,可燃气体探测器在泄漏30 s内做出报警响应视为合理。

1.4.3 工况设置

基于站场失效台账,本文以收球筒为泄漏源,基于控制变量法研究站场发生天然气泄漏后,在不同泄漏速率、风速和风向向下天然气的扩散规律。根据API581《基于风险的检测》,泄漏分为小孔泄漏、中孔泄漏、大孔泄漏以及完全破裂,当管道发生大孔泄漏或完全破裂时,泄漏气体会瞬间积聚,可燃气体探测器可以马上响应,且这两种失效事故实际生产中很少发生,故本文选择6.4、15.9以及25.4 mm的泄漏孔径作为研究对象,并通过式(7)计算泄漏率;根据金坛站场的风向玫瑰图,风速分别取无风(0)、年平均风速(3.1 m/s)、劲风(8.0 m/s),风向取4个主风向,即东风(-X)、南风(+Y)、西风(+X)和北风(-Y)。具体模拟工况见表3。

$$Q = C_0 A p_1 \sqrt{\frac{M k_0}{Z R T} \left(\frac{2}{k_0 + 1} \right)^{\frac{k_0 + 1}{k_0 - 1}}} \quad (7)$$

式中:

Q —气体泄漏率, kg/s;

C_0 —气体泄漏系数, 无因次;

A —泄漏孔口面积, m²;

p_1 —泄漏孔处压力, Pa;

M —气体摩尔质量, kg/mol;

k_0 —泄漏气体绝热指数, 无因次;

Z —气体压缩因子, 无因次;

R —理想气体常数, R=8.314 J/(mol·K)。

表3 模拟工况参数设定

Tab. 3 Simulation working condition parameter setting

方案	泄漏源	泄漏孔径/ mm	泄漏速率/ (kg·s ⁻¹)	风速/ (m·s ⁻¹)	泄漏方向	风向
1		6.4	0.456	3.1		东风(-X)
2		15.9	2.817	3.1		东风(-X)
3		25.4	7.188	3.1		东风(-X)
4	收球筒	25.4	7.188	0	+X	东风(-X)
5		25.4	7.188	8.0		东风(-X)
6		25.4	7.188	3.1		南风(+Y)
7		25.4	7.188	3.1		西风(+X)
8		25.4	7.188	3.1		北风(-Y)

1.5 模型验证

本文借助Liu^[25]的天然气管道泄漏扩散实验对FLACS的Dispersion模块进行验证。Liu等研究了3种不同建筑布局对天然气泄漏扩散情况的影响,得到不同监测点可燃气体随时间变化的浓度情

况。以监测点1为验证对象,本文在相同的条件下采用FLACS进行模拟计算,得到对应值并与实验结果进行对比,见图3及表4。

可以看出,实验和模拟中,同一点浓度随着泄漏时间增加的变化趋势大致相同,且最大相对误差

为 8.72%，小于 10.00%，因此，基于 FLACS 的天然
气泄漏扩散模拟具有一定的可靠性。

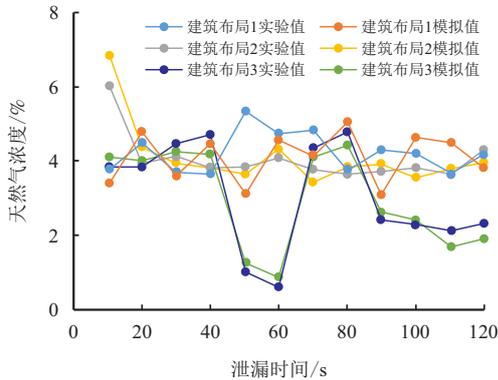


图 3 实验值与模拟值比较
Fig. 3 Comparison of experimental and simulated values

表 4 各工况最大误差
Tab. 4 Maximum error of each working condition

工况	绝对误差/%	相对误差/%
建筑布局 1	0.52	8.72
建筑布局 2	0.49	6.87
建筑布局 3	0.28	7.22

2 模拟结果及分析

2.1 不同泄漏速率下的扩散范围

图 4~ 图 5 为以泄漏速率为变量，在模拟工况
方案 1、2、3 条件下的模拟结果。

由图 4, 图 5 可以看出，泄漏初期，气体受泄漏
方向影响向 +X 方向喷射，随着气体扩散动能的减
弱开始逐渐受到风的作用而向 -X 方向扩散；气体
扩散前期只有较小云团，随着泄漏量的增加，气体
扩散范围逐渐变大，在泄漏 30 s 后，研究区内可
燃气体体积不再发生剧烈变化，说明此时扩散基本
达到平衡，高浓度气体分布基本稳定，气体扩散范
围达到最大。

GB 15322—2019 规定，可燃气体探测器应在
泄漏 30 s 内作出报警响应，故以 30 s 形成的气体
及其扩散最远距离作为依据评价天然气泄漏后的严
重程度。结合图 4~ 图 5 以及表 5 可知，泄漏速率
越大，研究区域内可燃气体体积越大，气体的扩散
范围越大，危险程度越高。

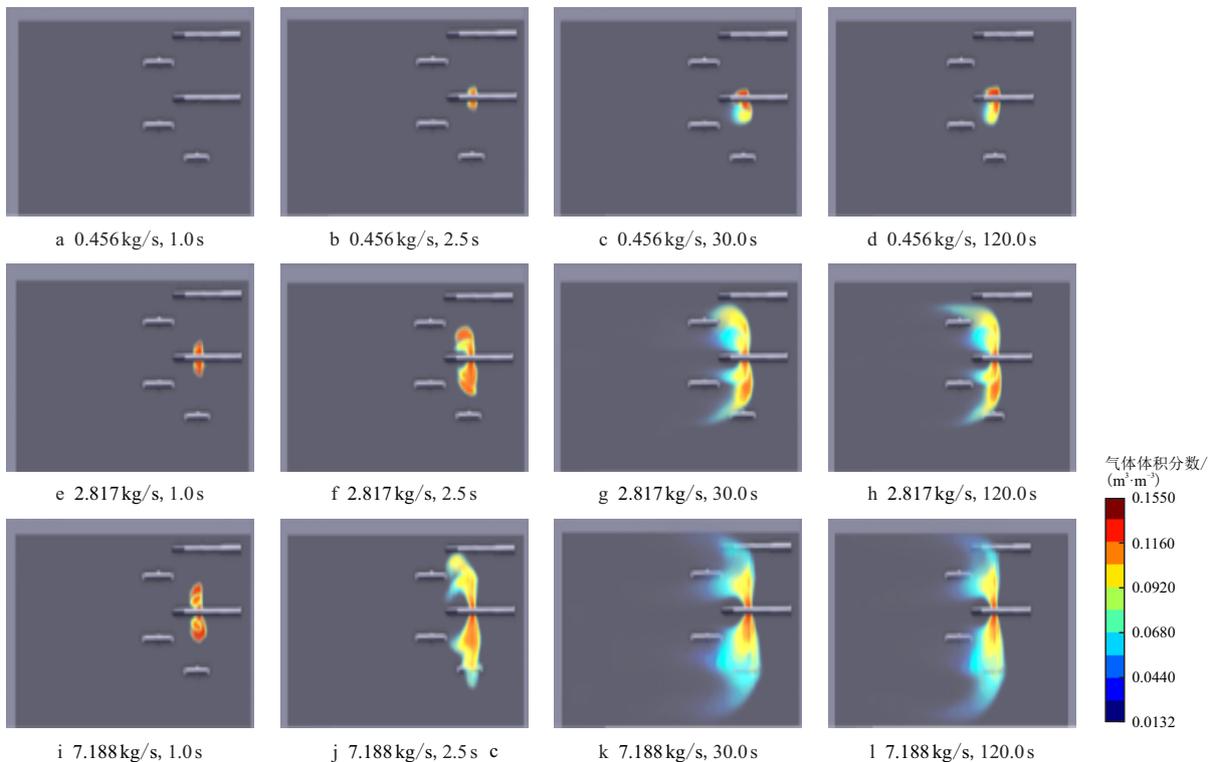


图 4 不同泄漏速率下气体发展情况
Fig. 4 Gas cloud development under different leakage rates

结合距泄漏源距离以及泄漏方向，表 6 列出了不
同泄漏速率、不同监测高度下，19#~24# 等 6 个监
测点位的报警时间。由表 6 可知，泄漏速率越大、监测

高度越低，探测器报警速度越快；经过比较，23# 点
位在不同泄漏速率、不同监测高度下报警时间均最
短，这是由于天然气泄漏初期，气体会随着泄漏方向

沿 +X 方向喷射一段距离, 随后进行稳定扩散。

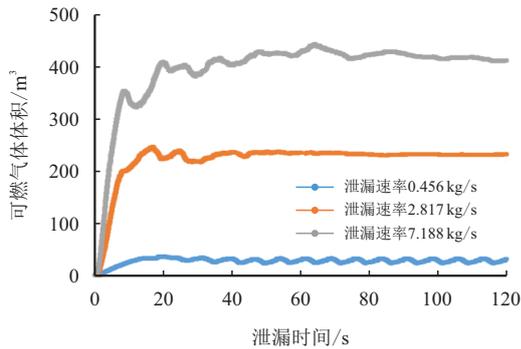


图 5 不同泄漏速率下可燃气体体积变化情况
Fig. 5 Changes in the volume of flammable gas cloud under different leakage rates

表 5 不同泄漏速率条件下可燃气体扩散最远距离 (30 s)
Tab. 5 The longest distance of flammable gas diffusion under different leakage rate conditions (30 s)

泄漏速率/(kg·s ⁻¹)	气体体积/m ³	扩散距离/m		
		X	Y	Z
0.456	422.19	8.0	4.1	4.8
2.817	231.14	29.4	14.5	5.2
7.188	31.17	35.5	23.0	7.6

如图 6 所示, 选择最小泄漏速率 0.456 kg/s 的工况下, 报警速度最快的 23# 监测点进行分析, 结果表明, 监测高度越低, 报警响应时间越短, 但总体时间间隔并不大, 均在可接受范围内。

表 6 不同泄漏速率条件下监测点位的报警时间 (30 s)

Tab. 6 Alarm time of monitoring points under different leakage rate conditions (30 s)

泄漏速率/(kg·s ⁻¹)	检测高度/m	达到一级报警值的时间/s						达到二级报警值的时间/s					
		19#	20#	21#	22#	23#	24#	19#	20#	21#	22#	23#	24#
0.456	0.5	4.30	2.92	1.78	1.20	1.01	7.25	4.89	3.35	2.03	1.31	1.07	9.00
	1.0	4.41	3.00	2.02	1.46	1.23	10.46	5.02	3.39	2.31	1.61	1.32	11.13
	1.5	4.50	3.16	2.40	1.63	1.41	12.07	5.23	3.55	2.72	1.78	1.56	12.95
	2.0	4.65	3.47	3.15	2.72	2.56	14.10	5.40	3.69	3.64	3.23	3.19	14.72
2.817	0.5	2.36	1.80	0.79	0.45	0.38	0.63	2.63	1.97	0.88	0.48	0.39	0.69
	1.0	2.44	2.05	0.84	0.55	0.46	1.04	2.78	1.56	0.93	0.59	0.48	1.38
	1.5	2.62	2.20	0.92	0.66	0.57	6.27	2.90	2.38	1.00	0.70	0.57	16.50
	2.0	2.93	2.31	1.12	0.83	0.71	3.02	2.60	1.24	0.89	0.75		
7.188	0.5	2.23	1.42	0.59	0.29	0.24	0.33	1.65	0.82	0.31	0.25	0.40	
	1.0	2.50	1.51	0.65	0.35	0.29	0.59	1.78	0.85	0.37	0.30	0.66	
	1.5		1.60	0.69	0.42	0.36			0.89	0.45	0.37		
	2.0			0.72	0.52	0.44			0.91	0.55	0.46		

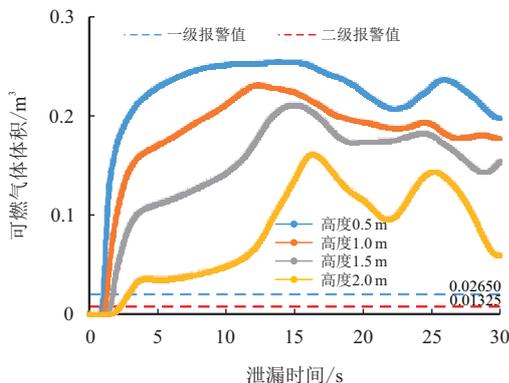


图 6 23# 监测点位在不同高度下的气体监测情况 (0.456 kg/s)
Fig. 6 The gas monitoring situation of monitoring points at different heights of 23# (0.456 kg/s)

选择最小泄漏速率 0.456 kg/s 的工况下, 高度为 0.5 m、与 23# 同 X 坐标的 7#、15# 监测点进行分

析, 如图 7 所示, 在 30 s 内, 距离泄漏源越近的监测点 (23#), 报警响应的速度越快, 距离泄漏源远的点位 (7#) 甚至无法达成响应。

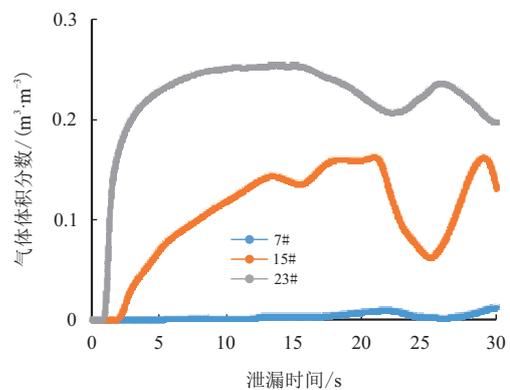


图 7 高度为 0.5 m 的不同监测点监测情况 (0.456 kg/s)
Fig. 7 Monitoring situation at different monitoring point with a height of 0.5 m (0.456 kg/s)

2.2 不同风速的影响

图 8~ 图 9 为以泄漏速率为变量,在模拟工况方案 1、4、5 条件下的模拟结果。可以看出,有风存在的情况下,可燃气体的扩散形态与不同泄漏速率影响下一致,气体喷射一段距离后受风向影响而向 -X 方向扩散,且风速越大,对气体的稀释作用越强,形成

的可燃气体越小;无风条件下,泄漏气体遇障碍物向两边扩散,并在站场围墙处存在气体堆积现象,气体浓度较高,达到扩散平衡后,研究区域内的可燃气体体积也最大。结合图 8~ 图 9 以及表 7 可知,风速越小,可燃气体不易扩散,研究区域内可燃气体体积越大,气云的扩散范围越大,危险程度越高。

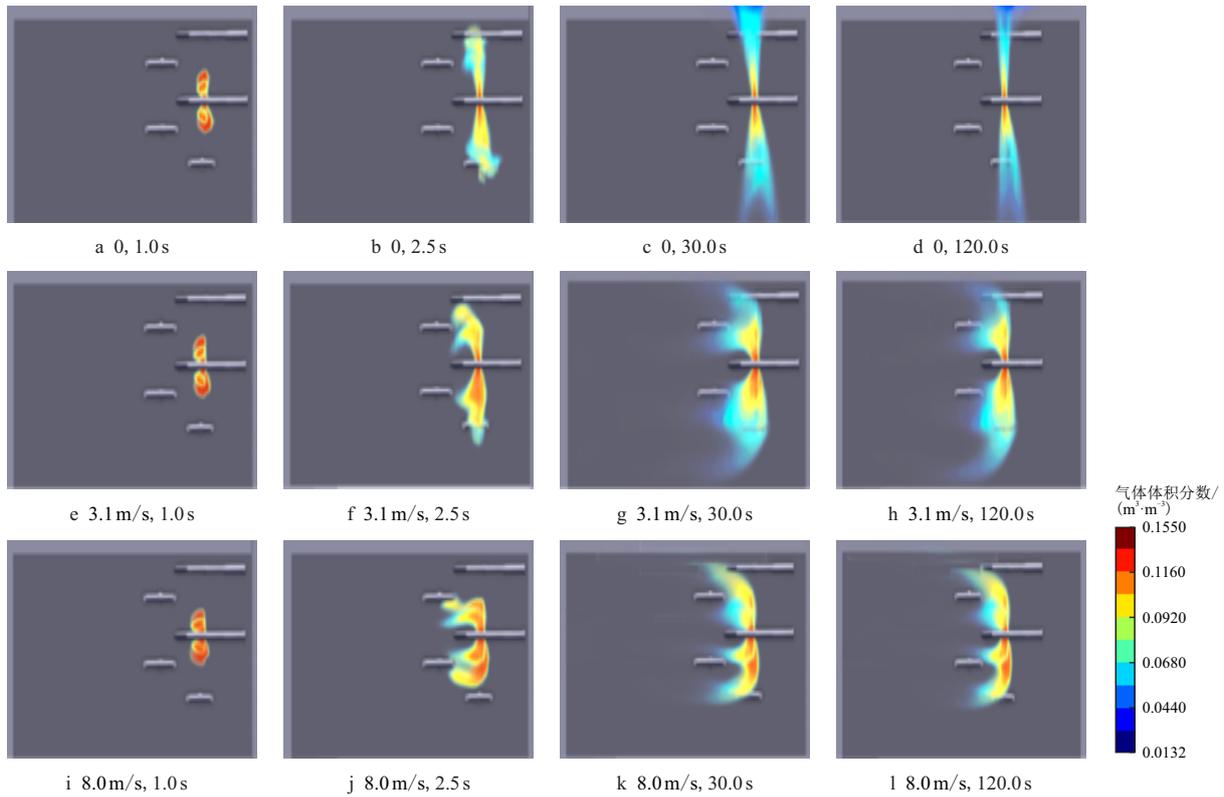


图 8 不同风速下气体发展情况
Fig. 8 Gas cloud development under different wind speeds

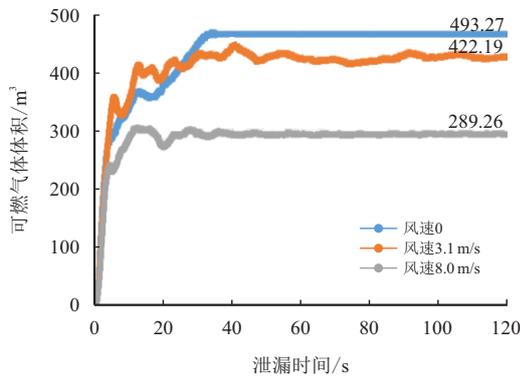


图 9 不同风速下可燃气体体积变化情况
Fig. 9 Variation of flammable gas cloud volume under different wind speeds

表 8 中列出了不同泄漏速率、不同监测高度下,19#~24# 等 6 个监测点位的报警时间。由表 8 可知,风速越大、监测高度越低,探测器报警速度

越快。如图 10 所示,选择最大风速 8.0 m/s 的工况下,报警速度最快的 23# 监测点进行分析,结果表明,监测高度越低,报警响应时间越短,但时间间隔小,对实际事故抢修并不会造成影响。选择最大风速 8.0 m/s 的工况下,高度为 0.5 m、与 23# 同 X 坐标的 7#、15# 监测点进行分析,如图 11 所示,在 30 s 内,距离泄漏源越近的监测点(23#),报警响应的速度越快。

表 7 不同风速条件下可燃气体扩散最远距离(30 s)
Tab. 7 The longest distance of flammable gas diffusion under different wind speed conditions (30 s)

风速/ (m·s ⁻¹)	气体体 积/m ³	扩散距离/m		
		X	Y	Z
0	530.31	26.4	36.1	8.3
3.1	422.19	35.5	23.0	7.6
8.0	289.26	34.7	16.5	5.0

表 8 不同风速条件下监测点位的报警时间(30 s)

Tab. 8 Alarm time of monitoring points under different wind speed conditions(30 s)

风速/ (m·s ⁻¹)	检测高度/ m	达到一级报警值的时间/s						达到二级报警值的时间/s					
		19#	20#	21#	22#	23#	24#	19#	20#	21#	22#	23#	24#
0	0.5				0.29	0.24	0.30				0.31	0.25	0.33
	1.0			0.64	0.36	0.30	0.37			0.39	0.31	0.41	
	1.5			0.68	0.43	0.36	0.45			0.46	0.38	0.50	
	2.0				0.53	0.44	0.59			0.57	0.46		
3.1	0.5	2.23	1.42	0.59	0.29	0.24	0.33	1.65	0.82	0.31	0.25	0.40	
	1.0	2.50	1.51	0.65	0.35	0.29	0.59	1.78	0.85	0.37	0.30	0.66	
	1.5		1.60	0.69	0.42	0.36			0.89	0.45	0.37		
	2.0			0.72	0.52	0.44			0.91	0.55	0.46		
8.0	0.5	1.05	0.81	0.41	0.27	0.24	0.41	1.12	0.90	0.50	0.29	0.25	0.43
	1.0	1.21	0.95	0.48	0.33	0.29	0.61	1.40	1.01	0.53	0.36	0.30	0.67
	1.5	1.30	1.03	0.55	0.41	0.36	2.53	1.45	1.09	0.59	0.44	0.37	
	2.0	3.14	1.90	0.66	0.52	0.46		3.38	3.28	0.73	0.57	0.49	

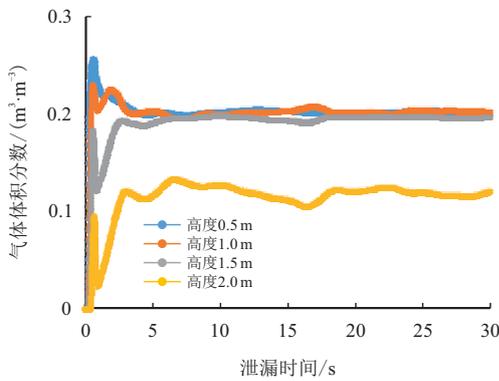


图 10 不同高度下同一监测点的气体监测情况(8.0 m/s)

Fig. 10 Gas monitoring at different heights at the same monitoring points (8.0 m/s)

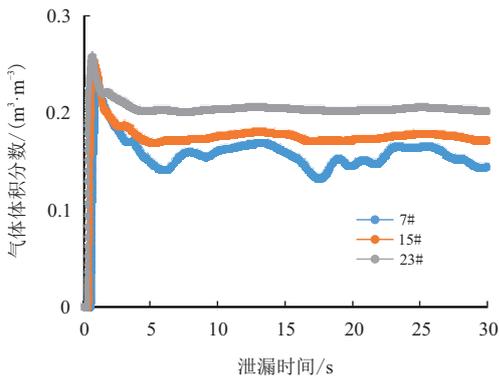


图 11 高度为 0.5 m 不同监测点监测情况(8.0 m/s)

Fig. 11 Monitoring situation of the different monitoring point with a height of 0.5 m (8.0 m/s)

2.3 不同风向的影响

表 9 为不同风向条件下可燃气体扩散最远距离,图 12~ 图 13 为以风向为变量,在工况 1、6、7、8 条件下的模拟结果。可以看出,泄漏方向与风向成 90° 时,风与气体混合的稀释作用强于顺风向泄漏,

泄漏气体与风发生动量交换,引起强烈湍流,导致可燃气体波动较大,但同时大大增加了扩散距离;泄漏方向与风向相反时,风与泄漏形成的气体混合强烈,最大程度稀释了气体,同时也最大程度扩展了气体,增加其危害范围。结合图 12~ 图 13 以及表 9 可知,风向与泄漏方向相同(顺风场景)可燃气体最小,扩散范围最小,危害性最小。

表 9 不同风向条件下可燃气体扩散最远距离(30 s)

Tab. 9 The longest distance of flammable gas diffusion under different wind direction (30 s)

风向	气体体积/ m ³	扩散距离/m		
		X	Y	Z
东风(-X)	422.19	35.5	23.0	7.6
南风(+Y)	372.89	33.2	22.2	7.4
西风(+X)	119.28	25.0	17.9	2.5
北风(-Y)	564.78	42.1	33.2	15.0

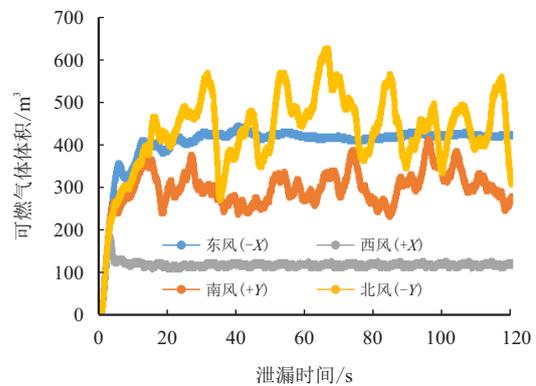


图 12 不同风向可燃气体体积变化情况

Fig. 12 Changes in the volume of combustible gas clouds under different wind direction

表 10 列出了不同泄漏速率、不同监测高度下,19#~24# 等 6 个监测点位的报警时间。由表 10 可

知,监测高度越低,探测器报警速度越快;逆风以及泄漏方向与风向成 90° 场景的探测器报警速度快于顺风场景。如图 14 所示,选择西风(+X)工况下,报警速度最快的 23# 监测点进行分析,结果表明,监测高度越低,报警响应时间越短,但时间间

隔小,对实际事故抢修并不会造成影响。选择西风(+X)工况下,高度为 0.5 m、与 23# 同 +X 坐标的 7#、15# 监测点进行分析,如图 15 所示,在 30 s 内,距离泄漏源越近的监测点(23#),报警响应的速度越快。

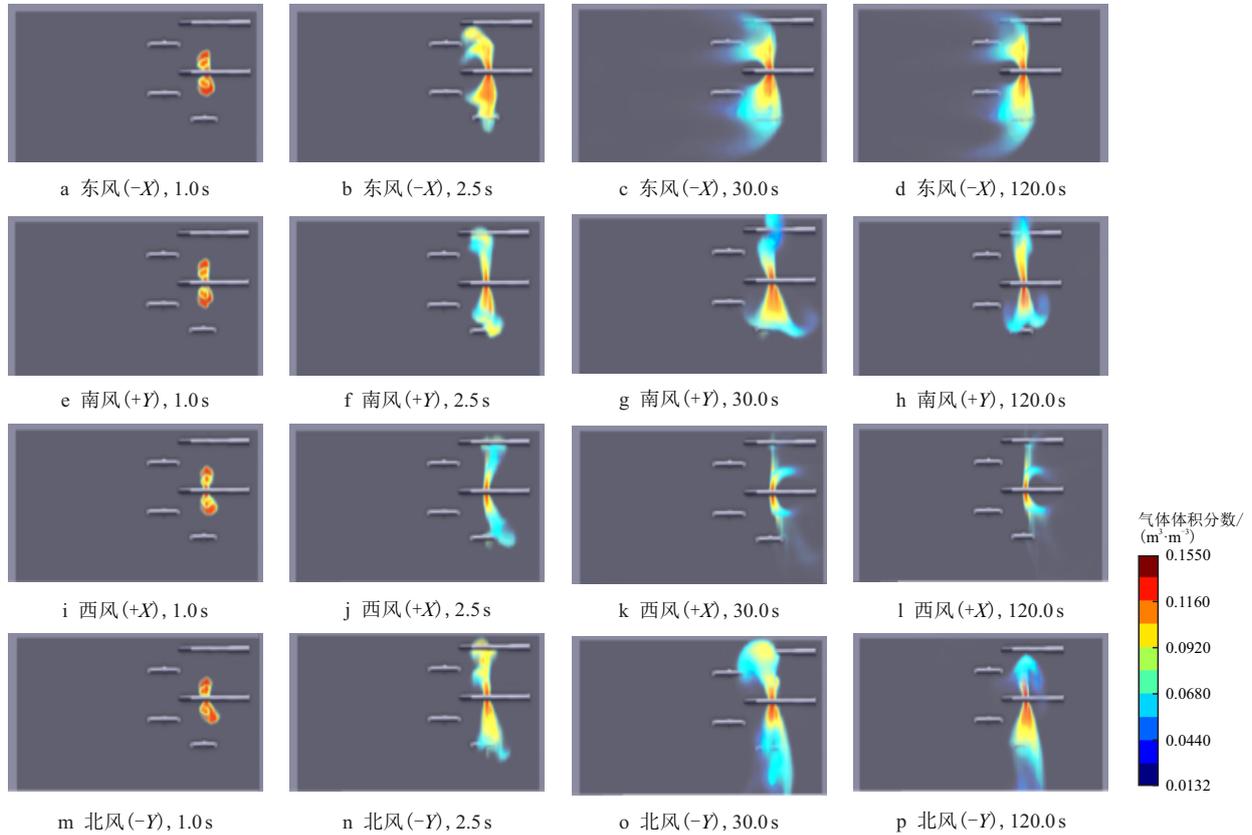


图 13 不同风向下气体发展情况
Fig. 13 The development of gas cloud under different wind direction

表 10 不同风向条件下监测点位的报警时间(30 s)

Tab. 10 Alarm time of monitoring points under different wind direction(30 s)

风向	检测高度/ m	达到一级报警值的时间/s						达到二级报警值的时间/s					
		19#	20#	21#	22#	23#	24#	19#	20#	21#	22#	23#	24#
东风(-X)	0.5	2.23	1.42	0.59	0.29	0.24	0.33	1.65	0.82	0.31	0.25	0.40	
	1.0	2.50	1.51	0.65	0.35	0.29	0.59	1.78	0.85	0.37	0.30	0.66	
	1.5		1.60	0.69	0.42	0.36			0.89	0.45	0.37		
	2.0			0.72	0.52	0.44			0.91	0.55	0.46		
南风(+Y)	0.5	12.07	11.67	10.03	0.30	0.25	0.33	14.78	14.26	13.77	0.32	0.26	0.42
	1.0	12.22	11.96	10.21	0.37	0.31	0.41	15.07	14.84	14.00	0.40	0.32	0.62
	1.5	12.87	12.14	10.80	0.44	0.37	0.49	15.35	15.06	14.57	0.47	0.38	9.43
	2.0	13.20	12.58	11.05	0.54	0.45	5.71	15.69	15.35	14.93	0.57	0.50	
西风(+X)	0.5				0.30	0.24	0.28				0.32	0.25	0.30
	1.0				0.38	0.29	0.33				0.42	0.30	0.36
	1.5				0.46	0.34	0.40				0.48	0.36	0.42
	2.0				0.60	0.43	0.49					0.44	0.52
北风(-Y)	0.5	15.32	15.42	15.36	0.26	0.21	0.28	15.82	16.08	16.22	0.29	0.22	0.29
	1.0	16.48	16.02	15.87	0.34	0.27	0.36	17.50	16.58	16.40	0.37	0.28	0.40
	1.5	17.99	17.04	16.35	0.42	0.34	0.46	18.26	17.68	17.01	0.45	0.36	0.58
	2.0	19.54	18.64	17.24	0.53	0.43	9.68	19.83	19.05	17.89	0.58	0.45	

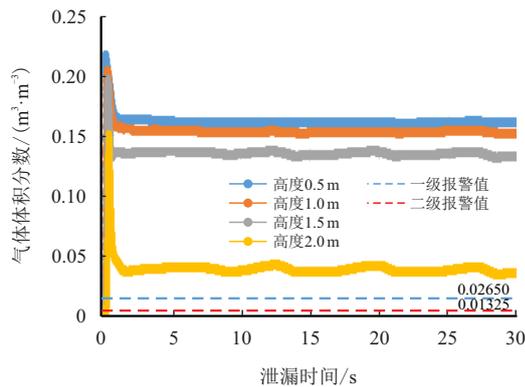


图 14 同一监测点位在不同高度下的气体监测情况(西风)

Fig. 14 Gas monitoring at different heights at the same monitoring points (westerly wind)

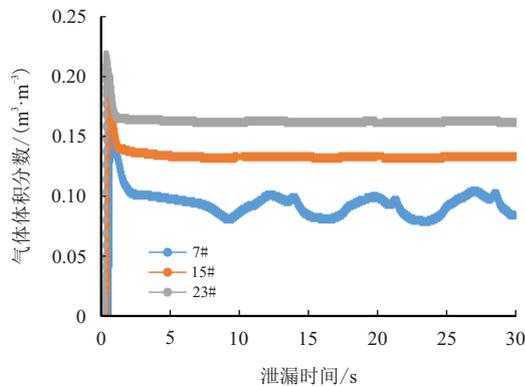


图 15 高度为 0.5 m 不同监测点监测情况(西风)

Fig. 15 Detection of different monitoring points with a height of 0.5 m (westerly wind)

2.4 可燃气体探测器设置位置优化

针对天然气管道站场, 面对复杂多变的风向、风速等外部环境条件, 不同设备多变的泄漏源强等内部条件的模拟结果, 可知距泄漏源越近、高度越低的监测点报警时间越短, 但其时间差在工程实际中可忽略。

为了能够及时、准确地检测到泄漏, 保证检测效果与检测灵敏性, 结合收球筒本身的安装高度及尺寸以及 GB 50493—2019 的规定“检测比重小于空气的可燃气体的探测器, 其安装高度应高出释放源 0.5~2.0 m”“探测器安装地点与周边工艺管道或设备之间的净空不应小于 0.5 m”, 建议收发球筒区可燃气体探测器应设置在距收球筒 1.0 m 处, 高度应设置为 2.0 m。

3 结 论

(1) 根据 30 s 内形成可燃气体扩散最远距离来

评价天然气泄漏后的灾害严重程度, 发现泄漏速率越大、风速越小时, 站场区域内可燃气体体积越大, 可燃气体扩散范围越广, 危险程度越高, 同时, 顺风向泄漏的危害程度要小于其他方向。

(2) 基于对不同泄漏速率、风速、风向影响下收球筒天然气泄漏情况的分析, 可知距泄漏源越近、高度越低的监测点报警时间越短, 但其时间差在工程实际中可忽略, 结合现场实际情况及 GB 50493—2019 的规定, 建议收发球筒区可燃气体探测器应设置在距收球筒 1 m 处, 高度设置为 2 m。

参考文献

- [1] 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. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976.2004.08.033
LI Youlü, YAO Anlin, LI Yongjie. Study on diffusion model of gas pipeline leaking[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(8): 102–104. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976.-2004.08.033
- [2] 夏海波, 张来斌, 王朝辉. 国内外油气管道泄漏检测技术的发展现状[J]. 油气储运, 2001, 20(1): 1–5. doi: 10.3969/j.issn.1000-8241-D.2001.01.001
XIA Haibo, ZHANG Laibin, WANG Chaohui. Development actualities of pipeline leak-detection technologies at home and abroad[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2001, 20(1): 1–5. doi: 10.3969/j.issn.1000-8241-D.-2001.01.001
- [3] 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): 118–122.
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): 118–122.
- [4] 张富胜, 程德永, 汪剑, 等. 氯硅烷管道泄漏事故分析[J]. 石油化工设备, 2021, 50(1): 76–80. doi: 10.3969/j.issn.1000-7466.2021.01.015
ZHANG Fusheng, CHENG Deyong, WANG Jian, et al. Analysis of leakage accident of chlorosilane pipeline[J]. Petro-Chemical Equipment, 2021, 50(1): 76–80. doi: 10.3969/j.issn.1000-7466.2021.01.015
- [5] 安建川. 输气管道泄漏模型不确定性因素敏感性分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2021, 43(1): 149–156. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2020.06.29.03
AN Jianchuan. Sensitivity analysis of uncertainty factors in gas pipeline leakage model[J]. Journal of Southwest Pe-

- troleum University (Science & Technology Edition), 2021, 43(1): 149–156. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2020.06.-29.03
- [6] 章博. 高含硫天然气集输管道腐蚀与泄漏定量风险研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010. doi: 10.7666/d.y1709479
ZHANG Bo. Analysis on risk due to corrosion and leakage of high sulfide natural gas gathering pipeline[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010. doi: 10.7666/d.y1709479
- [7] BERRY J, HART W E, PHILIPS C A, et al. Sensor placement in municipal water networks with temporal integer programming models[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2006, 132(4): 218–224. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:4(218)
- [8] BERRY J, FLEISCHER, HART W E, et al. Sensor placement in municipal water networks[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2005, 134(131): 237–243. doi: 10.1061/(ASCE)07339496(2005)131:3(237)
- [9] LEGG S W, BENAVIDES-SERRANO A J, SIROLA J D, et al. A stochastic programming approach for gas detector placement using CFD-based dispersion simulations[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2012, 47: 194–201. doi: 10.1016/j.compchemeng.2012.05.010
- [10] LEGG S W, SIROLA J D, WATSON J P, et al. A stochastic programming approach for gas detector placement in process facilities[C]. Savannah: Proceedings of the FOCAPO Conference, 2012.
- [11] LEGG S W, WANG C, BENAVIDES-SERRANO A J, et al. Optimal gas detector placement under uncertainty considering conditional-value-at-risk[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(3): 410–417. doi: 10.1016/j.jlp.2012.06.006
- [12] 吴梦雨. 成品油管道泄漏渗流扩散及停输优化研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2017.
WU Mengyu. Research on leakage diffusion of product oil pipeline and optimization of shutdown[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2017.
- [13] 李洋, 樊林华, 申成华. 基于正交试验的埋地输油管泄漏污染物扩散规律数值模拟[J]. *中外能源*, 2021, 26(2): 82–89.
LI Yang, FAN Linhua, SHEN Chenghua. Numerical simulation of diffusion mechanism of leakage pollutants from buried oil pipeline based on orthogonal test[J]. *Sino-Global Energy*, 2021, 26(2): 82–89.
- [14] 彭伟, 张俊, 袁宏永, 等. 深埋管道中泄漏孔对燃气泄漏影响的数值模拟[J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(10): 59–64. doi: 10.11731/j.issn.1673-193x.-2020.10.009
PENG Wei, ZHANG Jun, YUAN Hongyong, et al. Numerical simulation on influence of leakage hole on gas leakage in deep buried pipeline[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2020, 16(10): 59–64. doi: 10.11731/j.issn.1673-193x.2020.10.009
- [15] 张敬阳, 高永生, 李鑫, 等. 阳台燃气管道泄漏扩散模拟研究[J]. *安全*, 2020, 41(9): 57–61. doi: 10.19737/j.-cnki.issn1002-3631.2020.09.010
ZHANG Jingyang, GAO Yongsheng, LI Xin, et al. Simulation study on leakage and diffusion of gas pipeline on the balcony[J]. *Safety & Security*, 2020, 41(9): 57–61. doi: 10.19737/j.cnki.issn1002-3631.2020.09.010
- [16] 周宁, 王伟天, 陈兵, 等. 石化管道丁烷气体泄漏扩散数值模拟[J]. *安全与环境工程*, 2020, 27(2): 175–182. doi: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2020.02.024
ZHOU Ning, WANG Weitian, CHEN Bing, et al. Numerical simulation of butane gas leakage and diffusion in petrochemical pipelines[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2020, 27(2): 175–182. doi: 10.13578/j.cnki.-issn.1671-1556.2020.02.024
- [17] 李文英, 刘明礼, 钟卫, 等. 输气场站天然气泄漏检测及分析[J]. *天然气工业*, 2005, 25(6): 119–121. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976.2005.06.037
LI Wenyong, LIU Mingli, ZHONG Wei, et al. Detection and analysis of natural gas leakage in gas transmission stations[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(6): 119–121. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976.2005.06.037
- [18] 胡忆涛. 天然气管道泄漏分析及动态处理技术[J]. *天然气工业*, 2001, 21(4): 98–100. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976.2001.04.029
HU Yiwei. Natural gas pipeline leakage analysis and dynamic disposal technique[J]. *Natural Gas Industry*, 2001, 21(4): 98–100. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976.2001.04.-029
- [19] 刘恩斌, 彭善碧, 李长俊, 等. 基于瞬态模型的油气管道泄漏检测[J]. *天然气工业*, 2005, 25(6): 102–104. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976.2005.06.032
LIU Enbin, PENG Shanbi, LI Changjun, et al. Leak detection of oil and gas pipeline based on transient model[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(6): 102–104. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976.2005.06.032
- [20] 张文艳, 姚安林, 李又绿, 等. 风力对天然气管道泄漏后扩散过程的影响研究[J]. *天然气工业*, 2006, 26(12): 150–152. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976.2006.12.043
ZHANG Wenyan, YAO Anlin, LI Youlv, et al. Study on

wind influence of wind on gas diffusion process during gas pipeline leakage emergency[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(12): 150–152. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976-2006.12.043

- [21] 马梅, 蒋仲安. 隧道内埋地燃气管道泄漏扩散规律研究[J]. 石油与天然气化工, 2022, 51(1): 132–137. doi: 10.3969/j.issn.1007-3426.2022.01.021

MA Mei, JIANG Zhong'an. Study on leakage and diffusion law of buried gas pipeline in tunnel[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2022, 51(1): 132–137. doi: 10.3969/j.issn.1007-3426.2022.01.021

- [22] 侯永亮, 孟瑄, 宋峙潮, 等. 基于 FLUENT 的海上平台天然气泄漏扩散分析[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(3): 24–26. doi: 10.19981/j.CN23-1581/G3.2022.03-006

HOU Yongliang, MENG Xuan, SONG Zhichao, et al. Analysis of natural gas leakage and diffusion on offshore platform based on FLUENT[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(3): 24–26. doi: 10.19981/j.-CN23-1581/G3.2022.03.006

- [23] 罗涛, 马海峰, 胡坤, 等. 埋地燃气管道泄漏气体扩散机理分析[J]. 应用力学学报, 2021, 38(6): 2405–2410. doi: 10.11776/cjam.38.06.D137

LUO Tao, MA Haifeng, HU Kun, et al. Analysis of gas diffusion mechanism of gas leakage in buried gas pipeline[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(6): 2405–2410. doi: 10.11776/cjam.38.06.D137

- [24] 李超杰. 城市环境中危险液化气体泄漏扩散机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.

LI Chaojie. Study on hazardous liquefied gas release and dispersion in urban environments[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.

- [25] LIU Aihua, HUANG Jian, LI Zhiwen, et al. Numerical simulation and experiment on the law of urban natural

gas leakage and diffusion for different building layouts[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 54: 1–10. doi: 10.1016/j.jngse.2018.03.006

作者简介



尹恒, 1983年生, 男, 汉族, 四川成都人, 高级工程师, 主要从事油气站场完整性管理方面的研究。E-mail: smartyin@qq.com



邹庆, 1997年生, 男, 汉族, 四川达州人, 硕士, 主要从事油气管道安全方面的研究。E-mail: 1422539514@qq.com



廖柯熹, 1970年生, 男, 汉族, 四川成都人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事油气管道完整性管理方面的研究。E-mail: liaokxswpi@163.com



彭善碧, 1980年生, 女, 汉族, 重庆石柱人, 副教授, 硕士, 主要从事城市燃气管网完整性管理方面的研究。E-mail: shanbipeng@swpu.edu.cn

编辑: 牛静静

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>