

基于狭长受限空间燃气泄漏扩散特性及控制效果研究

王晓欢^{1,2} 林森¹ 闫苗苗¹ 陈英¹ 王永¹

(1.平高集团有限公司,河南 郑州 450018;2.河南平高电气股份有限公司,河南 平顶山 450001)

摘要 狭长受限空间燃气泄漏易引发火灾爆炸事故与资源浪费。应用数值模拟软件,建立狭长空间燃气泄漏模型,针对自然泄漏、通风与局部控制等不同条件,对甲烷泄漏扩散时空演化规律及控制效果进行研究及优化分析。结果表明:自然泄漏时,甲烷浓度呈“W”型对称式扩散分布,通风对燃气舱上游区甲烷具有扩散抑制力,对下游区甲烷具有扩散推动力;事故通风时,上游风流抑制甲烷扩散的动力和下游促进甲烷泄放的动力均增加,下游区甲烷峰值浓度降低 37.5%。局部控制使甲烷运移方向发生改变,报警时间延迟;优化控制后,甲烷整体向下游区运移,泄漏孔与局收 B 间甲烷降低 32.9%,甲烷峰值低于危险浓度 27%~38.05%,甲烷峰值平均降低率达到 43.09%,甲烷泄放率为 19.78%。研究结果可为狭长受限空间气体泄漏探测与控制提供思路和依据。

关键词 受限空间 输气管道 燃气泄漏 监测响应 数值模拟

Research on gas leakage diffusion characteristics and discharge control in long and narrow confined space

WANG Xiaohuan^{1,2} LIN Sen¹ YAN Miaomiao¹ CHEN Ying¹ WANG Yong¹

(1. Ping Gao Group Co., Ltd., Zhengzhou Henan 450018, China;

2. Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Pingdingshan Henan 450001, China)

Abstract Gas leakage in long and narrow confined spaces can easily cause fire and explosion accidents and resource waste. Numerical simulation software was used to establish a gas leakage model in a narrow space. The temporal and spatial evolution and control effect of methane leakage and diffusion were studied and optimized under different conditions such as natural leakage, ventilation, and local control. The results show that under natural leakage, methane concentration presents a symmetrical "W"-shaped diffusion distribution. Ventilation inhibits methane diffusion in the upstream area of the gas compartment and promotes diffusion in the downstream area. During accident ventilation, both the upstream airflow's inhibition on methane diffusion and the downstream airflow's promotion of methane release increase, reducing the peak methane concentration in the downstream area by 37.5%. Local control changes the methane migration direction and delays the alarm time. After optimized control, methane migrates overall to the downstream area, with methane concentration between the leakage hole and local collection device B decreasing by 32.9%. The peak methane value is 38.05% to 27% lower than the hazardous concentration, with an average peak reduction rate of 43.09% and a methane release rate of 19.78%. The research results can provide insights and a basis for gas leakage detection and control in long and narrow confined spaces.

Key words confined space gas pipeline gas leakage monitoring alarm response numerical simulation

0 引言

随着“双碳”政策的推动以及区域资源协调的强化,长距离管道输气工程得到广泛应用^[1]。城市综合管廊、化工园区气体管廊等的输气管道均处于狭长受限空间,一旦发生燃气泄漏,易引发火灾爆炸事故与资源浪费,泄漏气体泄放至空气中还会加剧温室效应^[2-3]。甲烷为无色无味气体,泄漏时信号特征不明显,根据相关文件^[4],管廊燃气舱需设置燃气泄漏

探测器,而监测响应与气体分布状态和浓度密切相关,因此对管道泄漏扩散分布及演化研究显得尤为重要。

燃气泄漏扩散受到多种因素的影响,国内外学者围绕不同泄漏因素进行了大量研究。BAGHERI M等^[5]模拟分析了不同条件下管廊燃气泄漏特征,并进行风险评价。TAN C等^[6]采用数值模拟管廊气体流动过程,分析确定了轻气分布于管廊顶部,重气堆

积在管廊底部。殷利鹏等^[7]研究了综合管廊不同几何结构顶部的燃气泄漏和扩散情况。钱喜玲等^[8]、WANG X M 等^[9]研究获得了管道压力与泄漏扩散规律,扩散范围随泄漏时间增加而扩大。周乐等^[10]对泄漏孔径大小与泄漏扩散发布研究发现,泄漏孔较小时对泄漏扩散影响比大孔径泄漏时更严重。雷鹏等^[11]、陈坤等^[12]基于 FLUENT 软件,对不同朝向的泄漏口泄漏过程进行模拟分析,确定泄漏孔朝向 X 轴正方向泄漏气体在喷出后与空气接触时间长,产生涡量更大。

为防止狭长受限空间有毒有害物质泄漏造成危害,通常会增设通风设施^[13-14]、挡垂板^[15-16]等。高保彬等^[17]利用数值模拟,对增设挡气板时泄漏探测和甲烷扩散开展控制效果研究。周宁等^[18]、吴建松等^[19]研究了通风对燃气舱泄漏扩散的影响,得到风速越大,泄漏孔附近湍流扰动增强。邓小娇等^[20]针对管廊正常通风—泄漏报警—事故通风—警报解除的全过程进行动态分析。

现有研究多以泄漏处两侧局部区段为研究对象,对长距离区段研究较少,并且忽略了泄漏甲烷扩散及泄放的实时演变分析。本文基于小孔泄漏理论,采用 CFD 数值模拟方法,构建狭长受限空间内燃气泄漏数值模型,综合考虑通风与回收策略,揭示狭长受限空间内气体泄漏扩散与回收泄放时空演化特性,优化控制方案,以期对狭长受限空间内输气管道泄漏监测、通风和回收等提供参考。

1 理论分析

输气管道气体泄漏扩散过程可表征为运动中的可压缩流体的密度变化的过程,其流体压力、温度同时产生变化。燃气从管道泄漏,其泄漏扩散过程遵循连续性方程、动量方程、能量方程^[17]。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

式中, ρ 为气体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; u_i 为流体在 i 方向的速度分量, m/s ; x_i 为流体在 i 方向的空间坐标。

动量方程:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \rho}{\partial x_j} (\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) + \rho g \quad (2)$$

式中, p 为压强, Pa ; u_j 为流体在 j 方向的速度分量, m/s ; x_j 为流体在 j 方向的空间坐标; μ 为分子黏性系数; g 为重力加速度, m/s^2 。

能量方程:

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \text{div}(\rho u_i T) = \text{div}(\frac{K}{C_p} \text{grad} T) + S_v \quad (3)$$

式中, T 为流体热力学温度, K ; K 为流体传热系数; C_p

为等压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; S_v 为黏性耗散项, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; div 为散度算子; grad 为梯度算子。

假设泄漏后其他系统均处于正常运行状态,则管道内燃气在射流作用下将从泄漏孔快速喷出,泄漏速度主要与输气管道内外压差有关,并受泄漏孔径大小以及管道内气体流速等因素影响。由于小孔泄漏的孔口尺寸较小,管道内燃气压力基本不变,泄漏孔气体流速随管道压力增大会出现壅塞现象,泄漏速度达到临界状态后不再上升。假设泄漏燃气为理想气体,泄漏气体及环境温度不变,根据文献^[21-22],达到临界压力值为:

$$CPR = (\frac{2}{C_k + 1})^{\frac{C_k}{C_k - 1}} = 0.548 \quad (4)$$

式中, CPR 为临界压力比, C_k 为天然气比热, $1.29 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。当 $P_0/P < CPR$ 时,小孔泄漏速度可达声波;当 $P_0/P \geq CPR$ 时,小孔泄漏速度为亚音速,而 $P_0/CPR = 0.1/0.548 = 0.18 \text{ MPa}$,本文管道压力为 0.8 MPa ,小孔的泄漏速度可达到声速。因此,泄漏流速^[23]为:

$$u_0 = \sqrt{C_k \cdot \frac{ZRT}{M_{\text{CH}_4}} \cdot (\frac{2}{C_k + 1})^{\frac{C_k + 1}{C_k - 1}}} \quad (5)$$

$$q = C_0 \frac{\pi d^2}{4} P \sqrt{C_k \cdot \frac{M_{\text{CH}_4}}{ZRT} \cdot (\frac{2}{C_k + 1})^{\frac{C_k + 1}{C_k - 1}}} \quad (6)$$

式中, q 为质量流量, kg/s ; u_0 为泄漏速度, m/s ; C_0 为泄漏系数, C_0 为 1; P 为管道压力, Pa ; M_{CH_4} 为甲烷的摩尔质量, $0.016 \text{ kg}/\text{mol}$; Z 为压缩系数, Z 为 1; R 为气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; d 为泄漏孔直径, m 。

甲烷爆炸下限体积分数为 5% (质量分数为 0.028 2),根据规定燃气舱内监测报警浓度设定值不得高于燃气爆炸下限值的 20%^[4],即燃气监测质量分数设定为 0.005 6,舱内达到该浓度时间定义为报警时间;甲烷浓度越接近爆炸下限时,危险性越大,将 80% 爆炸下限浓度 (甲烷质量分数 > 0.022 6) 定义为危险浓度,舱内达到该浓度的时间定义为危险浓度时间。

2 模型构建与边界条件

2.1 模型构建

基于某市城区综合管廊燃气舱狭长受限空间输气管道工程,采用 Fluent 模拟软件进行数值分析。根据实际工程条件,建立物理模型如图 1 所示。

燃气舱尺寸断面高 3.0 m、横向宽度为 1.9 m,左右两侧进/排风口尺寸为 1 m,燃气管道沿燃气舱底板布置,泄漏孔尺寸为 8 mm,泄漏孔左侧为上游区,右侧为下游区。距泄漏孔两侧各 50 m 处布置局部回收系统 A、B;距燃气舱顶板 0.3 m 位置处每隔 15 m 布置监测点 JC-0 — JC-7。

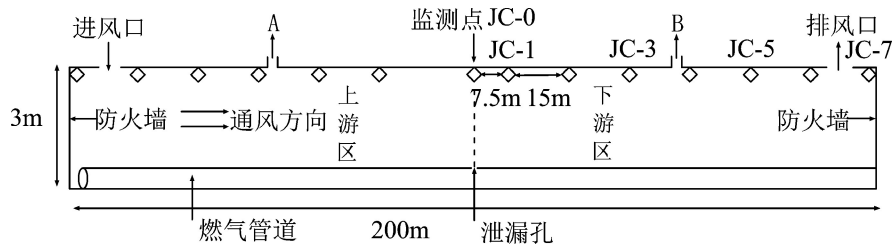


图1 狭长受限空间燃气舱物理模型

2.2 边界条件

数值计算基于压力求解器,采用 Standard κ - ε 模型模拟湍流流动、组分输运模型为 Species Transport,考虑全浮力影响,模拟天然气在燃气舱内的泄漏扩散过程。湍动能和耗散率的方程^[22]为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m \quad (7) \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8) \end{aligned}$$

式中, ρ 为气体密度, kg/m^3 ; u_i 为湍流黏性系数分量, m/s ; μ 为分子黏性系数; μ_t 湍流模型系数; G_k 为平均速度梯度产生的湍动能; G_b 为浮力产生的湍流动能; Y_m 为可压缩湍流中的波动扩张引起的耗散; S_k 为源项; 模型常数 $C_{1\varepsilon}$ 为 1.44, $C_{2\varepsilon}$ 为 1.92, $C_{3\varepsilon}$ 为 1.0, σ_k 为 1.0, σ_ε 为 1.3。

狭长受限空间内为标准大气压,在 y 轴方向添加 -9.8 m/s^2 的重力加速度分量;泄漏口、进风口为速度入口,排风口为压力出口。

2.3 模拟验证

为确保模型计算的精准性,模拟前对网格进行无关性验证。采用 Fluent 内置前处理器 Mesh 进行网格划分,为控制局部网格质量,对泄漏口、进风口及回收口进行网格细化,最终确定网格数 80 524,各监测甲烷浓度基本保持稳定,此时平均网格单元质量为 0.968。

参考文献[12]研究模型为 $200 \text{ m} \times 2.8 \text{ m}$ 狭长空间,正常通风时,分别对 7.5、22.5、52.5 m 处监测甲烷与本模型模拟数据对比见图 2,可知甲烷浓度变化趋势基本一致。监测点 7.5 m 处模拟结果与文献[12]误差约为 14.37%,泄漏初期受泄漏紊流强扰动,监测甲烷质量分数波动差异较大;本模型较文献[12]模型断面高 0.2 m,泄漏时间越长,通风对舱内甲烷稀释效果较弱,表征为泄漏时间越长时监测甲烷质量分数略高。同时监测点 22.5、52.5 m 处模拟结果与对比模型误差约为 10.57%、11.97%,模拟结果误差在可接受范围,表明物理模型得到验证。

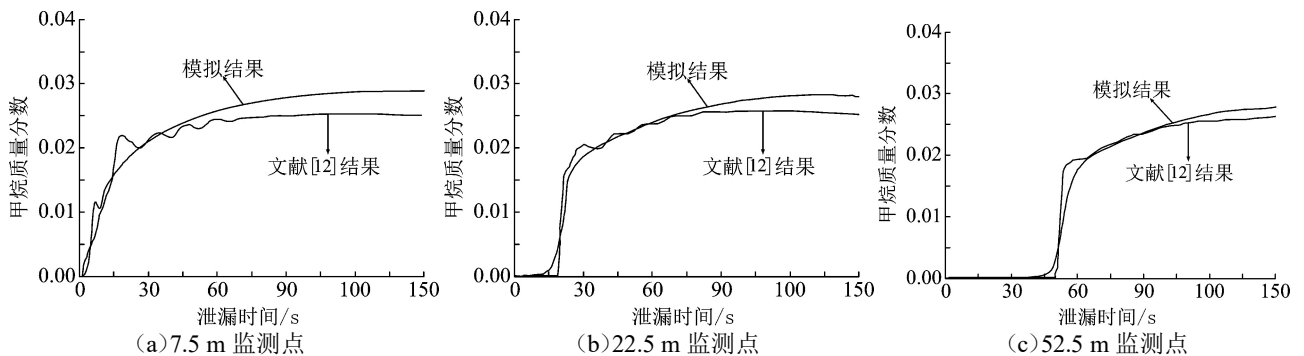


图2 模拟结果与文献[12]结果对比

3 结果与分析

3.1 泄漏甲烷扩散演变特性

为获得狭长受限空间输气管道燃气泄漏优化控制方案,首先需要对不同条件下泄漏扩散过程进行分析。管廊燃气舱通风系统设计要求采用机械通风,正常通风次数需满足 6 次/h,事故通风次数需满足 12 次/h^[4]。

3.1.1 泄漏甲烷扩散分布

舱内受限空间无通风密闭环境泄漏可视为一种自然泄漏状态,其甲烷扩散随泄漏时间演化分布如图 3(a)所示,正常通风和事故通风不同泄漏时间甲

烷扩散演化分布如图 3(b)、(c)所示。

由图 3 可知,受限空间内不同条件下甲烷泄漏扩散演化差异较大。自然泄漏如图 3(a)所示,泄漏甲烷初始动力较大率先冲击至舱顶,后沿顶板向两侧与下部翻腾式扩散,扩散距离随泄漏时间均匀增加,整体以泄漏孔为中心呈“W”型对称式分布。当 $t=10 \text{ s}$ 时,舱内甲烷沿横向扩散距离为 17 m,而 $t=30 \sim 150 \text{ s}$ 时,纵向扩散距离分别为 31、52、73、93、100 m,扩散距离与泄漏时间呈正相关,扩散增量随扩散距离增大呈下降趋势,这是因为舱内属于受限空间,甲烷扩散仅能依靠泄漏时自有射流赋予的初速度,泄漏

孔附近甲烷在气体黏滞力和空气阻力作用下,扩散动能从泄漏孔中心位置向纵向对称递减并逐渐消耗;垂向甲烷气体在舱顶部扩散能力大于中下部,由于受到廊壁限制,部分甲烷由上部向中部区域扩散,甲烷浓度出现明显分层。在 $t=120\text{ s}$ 后逐渐扩散至左

右廊壁,并大量向下部空间蔓延,危险区随之扩大。甲烷扩散会产生局部积聚效应,受浮力影响泄漏甲烷易在顶板区域富集与聚集,同时泄漏孔附近甲烷浓度显著升高,局部区域危险性增加。

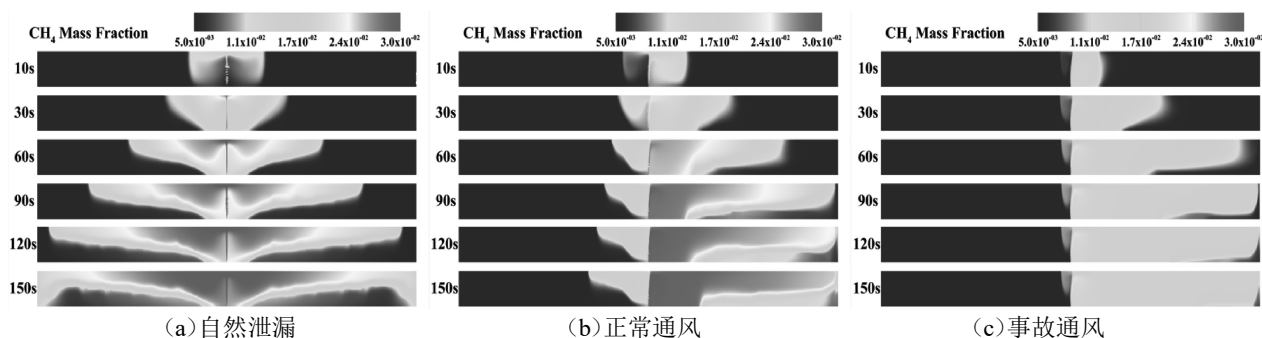


图3 泄漏甲烷扩散演变分布

由图3(b)可知,通风注入的空气对舱内泄漏甲烷具有明显稀释和驱替效果,甲烷浓度整体降低。通风对上游区甲烷具有扩散抑制效果,甲烷扩散动力减弱,扩散距离缩减至泄漏孔左侧 $16 \sim 33\text{ m}$,且主要集中在舱内中上部区域,随持续泄漏扩散距离有增加趋势。通风对下游区甲烷具有扩散推动力,泄漏初期便推动甲烷向下部空间扩散,同时促进甲烷向排风口扩散与泄放,随泄漏时间持续增加,开始向舱内中下部区域聚集,泄漏 90 s 时,下游甲烷已扩张至右侧廊壁,此时泄漏甲烷占据整个下游空间,且在泄漏孔右侧附近形成较高浓度危险区域。正常通风时显然对降低舱内高浓度甲烷与缩减扩散分布能力

均有限。对比图3(c)事故通风即通风速度增加时,上游风流抑制甲烷扩散的动力和下游促进甲烷泄放的动力均增加,泄漏孔周围及上游区甲烷明显被通风气流驱替,甲烷分布集中到整个下游区,区域内甲烷峰值减少 37.5% ; $30 \sim 60\text{ s}$ 时,由于通风作用相同时间内扩散依次增加 $8、19\text{ m}$; 90 s 时,甲烷扩散向舱内下部空间聚集,事故通风能减弱整体甲烷分布浓度。

3.1.2 监测响应

甲烷监测报警时间越短,对维检和危险控制越有利,不同监测点甲烷浓度随泄漏时间变化规律如图4所示。

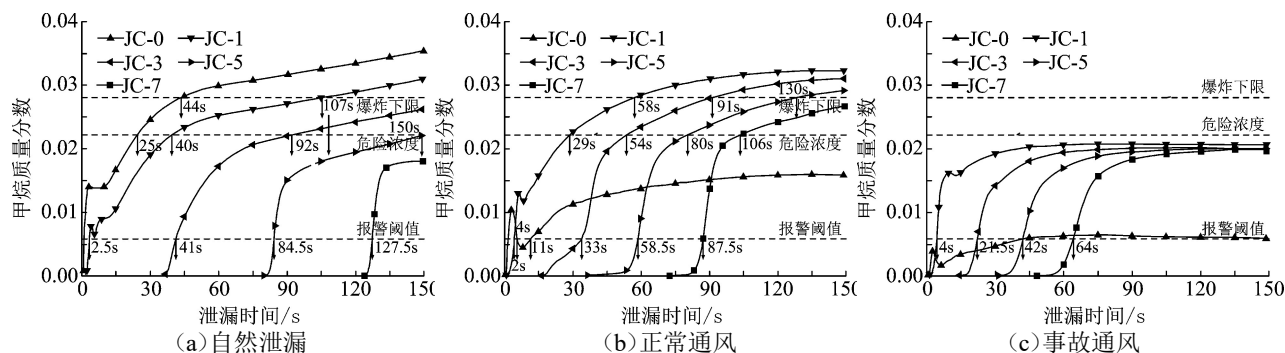


图4 监测点甲烷质量分数变化曲线

由图4(a)可知,自然泄漏时,不同监测点甲烷浓度达到报警时间依次为 $0.5、2.5、41、84.5$ 和 127.5 s ,泄漏甲烷直接喷射至廊顶,泄漏孔处监测点甲烷浓度前期变化剧烈,絮流现象明显,各监测点处甲烷浓度峰值依次急速上升,随后持续增加并逐渐趋于稳定,这是因为远离泄漏孔时,泄漏甲烷扩散动能逐渐消耗,甲烷浓度增加变缓。同时,大量甲烷气体向舱内空间扩散,JC-0、JC-1、JC-3、JC-5 甲烷浓度迅速上升,分别在 $25、40、92、150\text{ s}$ 依次达到危险浓度,JC-0、JC-1 在 $44、107\text{ s}$ 依次达到爆炸下限,形成爆炸浓度

区域。

由图4(b)和图4(c)可知,正常通风时,甲烷在泄漏初期达到报警时间有所提前,表明通风加速下游甲烷聚集。泄漏孔处 JC-0 在 4 s 时刻甲烷浓度被稀释至报警阈值以下,而后在 11 s 时又重新增加,且始终低于危险浓度,对比发现通风对泄漏处甲烷稀释效果最佳,其余监测点受通风推动力积聚响应监测浓度增大,达到报警浓度时间依次为 $2、33、58.5、87.5\text{ s}$,达到危险浓度时间平均提前 30.7 s ,距泄漏孔最远处 JC-7 在 150 s 时达到爆炸浓度,即正常通风

反而使下游区爆炸危险性增加。事故通风时, JC-0 报警时间延长至 42 s, 且之后逐渐趋于报警浓度值, 因此已不具有参考价值, JC-1 报警时间相同, JC-3、JC-5、JC-7 报警时间依次提前 11.5、16.5、23.5 s; 各监测点监测值随泄漏时间逐渐趋于稳定且低于危险浓度, 但仅低于危险浓度 2.65%~7.08%。由此可见, 增加通风速度对降低舱内甲烷整体浓度有效。

3.2 局部控制泄漏甲烷扩散演变特性

3.2.1 甲烷扩散分布

舱内受限环境泄漏范围相对可控, 通过监测系统与防爆回收系统联动可实现局部范围内泄漏甲烷收集, 从而实现对舱内甲烷局部控制降低浓度的目的。不同泄漏时间甲烷扩散分布如图 5 所示。

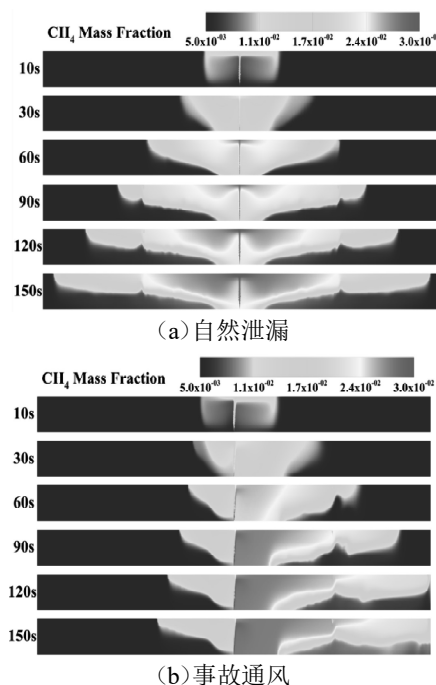


图 5 局部控制甲烷扩散演变分布

局部回收系统使受限空间内甲烷运移方向发生改变, 由图 5(a)和图 3(a)对比可知, 泄漏甲烷在经过局收口时被有效拦截, 较高浓度甲烷区域缩减至 2 个局收口之间。同时, 泄漏扩散动能超过回收动能使得一部分低浓度甲烷越过局收口持续扩散, 增加局收口泄放对舱内甲烷扩散分布无显著影响, 但使得舱内高浓度甲烷减少。

由图 5(b)可知, 事故通风时以泄漏孔为中线下游区甲烷浓度整体高于上游区。上游区甲烷受局收 A 引流动力、进风驱散动力和泄放扩散动力影响, 一部分运移至局收口进行泄放, 剩余部分在中上部区域形成报警响应区。下游区甲烷主要参与局收 B、排风口引流和泄漏扩散三重动力作用, 促进甲烷排出及空气流动, 局收口附近甲烷浓度降低, 局收 B 卷吸作用使甲烷向底部翻转, 同时通风动能在上游区

抑制扩散作用被消耗, 风流减弱, 部分风流优先从局收 A 排出, 同时局收 B 起到一定隔离作用, 导致泄漏孔与局收 B 之间甲烷浓度明显升高。可见局部回收与通风联合作用时, 主要表现为对舱内中下部局部区域甲烷泄放效果显著, 同时存在通风风力被削减的后果。

3.2.2 监测响应

泄漏下游区监测甲烷浓度随时间变化规律如图 6 所示。仅采用局部控制时, 报警时间依次为 3.5、35、95 s。局部回收和事故通风泄放时, 报警时间依次为 3、25、66.5、108 s, 报警时间延迟, 但 JC-0、JC-7 甲烷浓度低于危险浓度, JC-1、JC-3、JC-5 达到危险浓度时间依次为 46、76、150 s, 特别是各监测点陆续达到危险浓度而均低于爆炸浓度, 对比图 3(a)、(c)原因是局收 A 引流和抑制泄漏扩散削弱了风流由上游至下游的穿越动力, 增加局部甲烷泄放的同时局部危险浓度也随之增加。

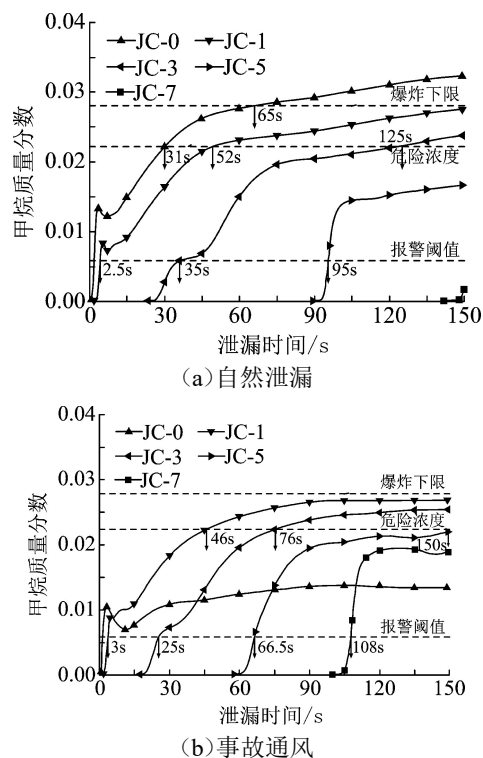


图 6 局部控制监测点甲烷质量分数变化曲线

3.3 优化控制泄漏扩散演变特性

事故通风时, 下游区甲烷浓度仍接近危险浓度, 增加局收 A、B 时, 局收 A 引流导致甲烷向上游区扩散, 同时增加下游区局部甲烷浓度。为高效控制甲烷, 综合通风和局部控制甲烷扩散分布结果, 优化控制方案, 仅保留局收 B 并采取事故通风。

3.3.1 泄漏甲烷扩散分布与监测响应

优化控制甲烷分布及监测点甲烷浓度变化曲线如图 7、图 8 所示。当启动局收 B 和事故通风时, 舱

内甲烷因局收及通风双重泄放作用, 甲烷整体向下游区运移, 较事故通风时泄漏孔与局收 B 间甲烷浓度整体降低 32.9%, 越过局收 B 时甲烷浓度再次小幅度降低, 此时舱内泄漏甲烷得到有效控制。对比图 3(c) 优化控制相较事故通风时各监测点甲烷变化相似, JC-0 甲烷浓度变化不明显, JC-1、JC-3、JC-5、JC-7 报警时间依次为 3.5、22、51、82.5 s, 甲烷浓度峰值为 0.014 ~ 0.016 5, 低于危险浓度 27% ~ 38.05%, 随泄漏时间未有增长趋势, 表明优化控制使得舱内泄漏存余甲烷大量减少, 采用此种方案具有可行性。

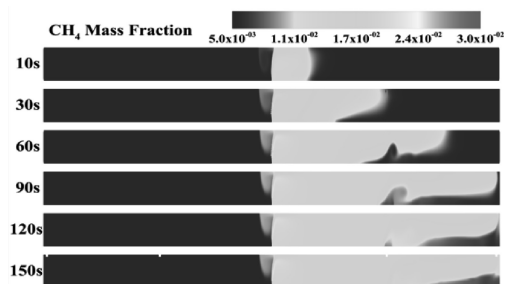


图 7 优化控制甲烷扩散演变分布

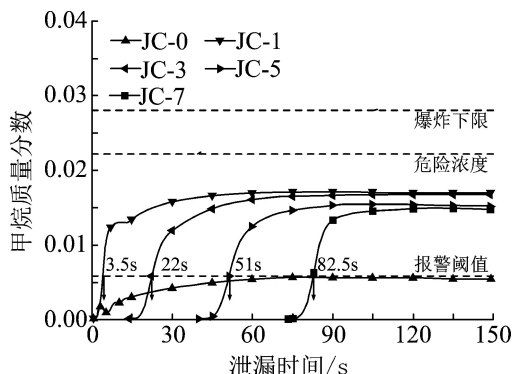


图 8 优化控制监测点甲烷质量分数变化曲线

3.3.2 优化控制效果分析

为进一步检验优化控制对舱内甲烷控制效果, 视自然泄漏状态 150 s 舱内监测甲烷峰值为初始值, 对不同条件下各监测点甲烷峰值稀释降低率进行计算, 结果见表 1。通风控制时, 正常通风仅对 JC-0 稀释效果明显, 事故通风加强甲烷向下游区运移并向排风口汇集, 各监测值稀释效果依次减弱。局部控制时, JC-3 受局收口卷积作用, 稀释效果不强, JC-5、JC-7 为局收 B 后监测点, 峰值降低显著。优化控制局收 B 和排风口同时减少舱内甲烷, 泄漏扩散初始阶段便被有效稀释, 甲烷在泄放前无法继续升高。综合对比, 优化控制甲烷峰值平均峰值降低率最高, 为 43.09%, 表明此方案能够有效控制受限空间内泄漏甲烷。

150 s 泄漏时间内, 进/出甲烷气体量等于排风、回收口尺寸与其排出甲烷加权平均速度乘积, 排出甲烷气体量与泄漏甲烷气体量的比值为舱内甲烷泄

放率(图 9)。通风控制时, 排风口为舱内甲烷唯一泄放口, 由于甲烷与舱内空气混合甲烷浓度值降低, 甲烷泄放量较低。仅设置局收 A、B 时在舱内甲烷泄放量最低; 局收 A、B 与通风同时设置时, 甲烷泄放率为 15.38%。优化控制后, 甲烷泄放率达到 19.79%, 远大于单一事故通风泄放, 且泄漏甲烷被控制在下游区, 为舱内检修提供了有利条件。

表 1 甲烷峰值降低率

单位: %

工况	JC-0	JC-1	JC-3	JC-5	JC-7	平均值
通风 正常通风	55.20	-4.35	-18.34	-32.10	-48.12	-9.54
控制 事故通风	83.19	33.22	23.62	9.06	-9.60	27.89
局部 自然泄漏	8.50	11.07	9.12	24.17	92.94	29.16
控制 事故通风	62.04	13.20	3.08	0.14	4.97	14.70
优化控制	84.91	44.96	36.42	31.06	18.10	43.09

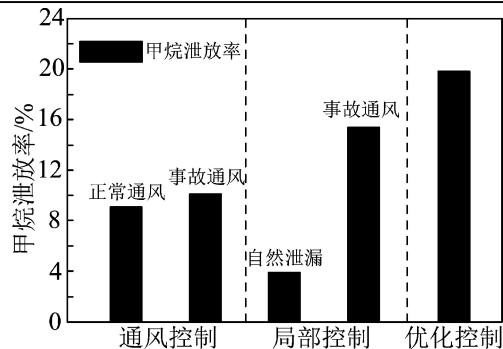


图 9 优化控制甲烷泄放效果

综上, 考虑管道泄漏具有随机性, 200 m 长管廊区段建议将局部回收系统布置于通风中下游区为宜。通常最接近泄漏处的探测器先发生报警, 但受通风稀释影响可能会延迟监测响应, 常规管廊燃气舱每隔 15 m 需布置一台探测器, 因此优化控制后建议将气体探测器设置于每处局收装置两侧。优化控制方案更适用于泄漏严重情形, 可有效节约探测器使用, 为优化狭长受限空间泄漏气体控制方案提供新思路与依据。有关狭长受限空间泄漏气体通风与回收控制有效性, 仍需大量模拟、试验及工程检验, 同时还应考虑回收系统动力、安装及间距的控制效果。

4 结论

(1) 自然泄漏, 甲烷以泄漏孔为中心呈“W”型对称式分布, 易在顶板区域富集与聚集, 增加局部区域危险性。通风对上游区甲烷具有扩散抑制力, 对下游区甲烷具有扩散推动力, 促进甲烷扩散与泄放。事故通风使甲烷集中至整个下游区, 区域内甲烷峰值减少 37.5%, 各监测点甲烷低于危险浓度 2.65% ~ 7.08%。

(2) 局部回收系统使甲烷运移方向发生改变, 受限空间内高浓度甲烷分布减少。事故通风时, 报警时间延迟, 上游区甲烷在中上部区域形成报警响应

区;下游区甲烷主要参与局收 B、排风口引流和泄漏扩散动力作用,舱内中下部局部区域甲烷泄放效果显著。

(3) 优化控制后,泄漏孔与局收 B 间甲烷降低 32.9%,受限空间内甲烷峰值低于危险浓度 27%~38.05%,甲烷峰值平均降低率达到 43.09%;甲烷泄放率为 19.79%,泄漏甲烷被控制在下游区,极大削弱了危险浓度空间的形成。

参考文献

- [1] 李天娇, 谢飞, 张瑛, 等. 天然气管道掺氢输送技术研究进展[J]. 油气储运, 2024, 43(12): 1337-1347.
- [2] 段鹏飞, 张进盛, 常曦文, 等. 掺氢天然气在管廊中的泄漏扩散特性[J]. 油气储运, 2023, 42(8): 901-909.
- [3] 师燕超, 么志远, 袁明德, 等. 综合管廊天然气泄漏爆炸的定量风险评估[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(11): 129-136.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市综合管廊工程技术规范: GB 50838—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [5] BAGHERI M, ALAMDARI A, DAVOUDI M. Quantitative risk assessment of sour gas transmission pipelines using CFD[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 31: 108-118.
- [6] TAN C, LIN Y, WANG T. CFD analysis of gas diffusion and ventilation protection in municipal pipe tunnel[C]. International Conference on Data Mining, Communications and Information Technology. ACM, 2017: 28.
- [7] 殷利鹏, 邢志祥, 朱飞昊, 等. 地下综合管廊燃气泄漏数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(6): 99-104.
- [8] 钱喜玲, 闫小燕, 赵江平. 地下综合管廊天然气管道泄漏扩散模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(11): 85-89.
- [9] WANG X M, TAN Y F, ZHANG T T, XIAO R, YU K C. Numerical study on the diffusion process of pinhole leakage of natural gas from underground pipelines to the soil[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 87: 103792.
- [10] 周乐, 周廷鹤, 张卫军. 最不利管道泄漏情形下燃气管廊的安全性评估[J]. 油气储运, 2021, 40(2): 8.
- [11] 雷鹏, 陈长坤, 史聪灵, 等. 管廊内泄漏口朝向对天然气管道泄漏扩散影响的模拟分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(10): 133-139.
- [12] 陈坤, 林浩, 陈洁, 等. 通风状态下综合管廊燃气管道小孔泄漏扩散模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(10): 3545-3553.
- [13] 蒋宏业, 寇明月, 廖柯熹, 等. 掺氢天然气管道泄漏扩散研究现状及发展趋势[J]. 油气储运, 2024, 43(8): 855-868.
- [14] 沈静, 杜胜群, 李昕岳, 等. 地下综合管廊天然气泄漏扩散及爆炸研究综述[J]. 灾害学, 2025, 40(1): 129-134.
- [15] 邓奇根, 杨炎杰, 李伟华, 等. 狭长密闭空间高硫天然气泄漏组合控制效果研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(10): 4463-4468.
- [16] 陈祉颖, 牛国庆, 王舒梦, 等. 基于空气幕与排烟系统的隧道火灾烟气控制研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(4): 104-110.
- [17] 高保彬, 任闯难, 刘彦伟, 等. 挡气板对综合管廊燃气泄漏扩散影响规律研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(7): 35-40.
- [18] 周宁, 任福平, 陈兵, 等. 风速对综合管廊天然气管舱泄漏扩散影响的数值模拟[J]. 天然气化工: C1 化学与化工, 2020, 45(2): 7.
- [19] 吴建松, 原帅琪, 蔡继涛, 等. 基于 OpenFOAM 的综合管廊舱内燃气泄漏扩散数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(2): 168-173.
- [20] 邓小娇, 姚安林, 徐涛龙, 等. 城市综合管廊燃气舱室输气管道泄漏扩散规律研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(11): 84-89.
- [21] WANG X M, TAN Y F, ZHANG T T, et al. Diffusion process simulation and ventilation strategy for small-hole natural gas leakage in utility tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 97: 103276.
- [22] 王保国, 刘淑艳. 气体动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.
- [23] LU H F, HUANG K, FU L D, et al. Study on leakage and ventilation scheme of gas pipeline in tunnel[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 53: 347-358.

作者简介 王晓欢(1997—), 男, 硕士, 从事通风与防火防爆、灾害演化数值模拟研究, 新能源和电力施工安全等安全管理工作。E-mail: PG_wxh@163.com。

(收稿日期: 2025-05-13)