

基于CFD的综合管廊燃气舱燃气管道泄漏扩散模拟研究

胡镁林

云南中石油昆仑燃气有限公司, 云南 昆明

收稿日期: 2025年6月6日; 录用日期: 2025年9月5日; 发布日期: 2025年9月18日

摘要

针对综合管廊燃气舱内燃气管道小孔(15 mm)和大孔(60 mm)泄漏扩散特征不清楚的问题, 本文构建了实际的200米防火分区的三维模型, 采用结构化网格划分并设置有效的边界条件, 实现了其实际工况的数值模拟。分析发现: 小孔泄漏时因流量较小, 12秒后甲烷浓度达爆炸下限(0.05)的区域仅0.5米, 扩散范围有限; 大孔泄漏因高速射流(259 m/s)和事故通风(12次/h)情况存在, 11秒即可形成15米长的爆炸危险区, 覆盖面较广。实际燃气泄漏探测器优化结果显示, 水平间距15米时大孔泄漏中最不利报警时间为4.25秒, 符合规范但建议实施加密布置; 竖直方向上距顶0.3米与顶部安装时报警时间差异小于0.3秒, 符合现行的标准规范。研究结果为综合管廊燃气安全设计提供了可靠依据、为燃气泄漏探测器布置奠定了优化依据。

关键词

计算流体力学, 综合管廊, 燃气舱, 燃气管道, 泄漏扩散模拟

Research on CFD Based Simulation of Gas Pipeline Leakage and Diffusion in Comprehensive Pipe Gallery Gas Cabin

Meilin Hu

Yunnan PetroChina Kunlun Gas Co., Ltd., Kunming Yunnan

Received: Jun. 6th, 2025; accepted: Sep. 5th, 2025; published: Sep. 18th, 2025

Abstract

Addressing the issue of unclear leakage and diffusion characteristics of gas pipelines featuring small

holes (15 mm) and large holes (60 mm) within the gas cabin of comprehensive utility tunnels, this paper presents the construction of a three-dimensional model for an actual 200-meter fire compartment. By employing structured grid division and establishing effective boundary conditions, numerical simulation of the actual operating conditions is achieved. Analysis reveals that, in the case of small hole leaks, due to the minimal flow rate, the area where methane concentration reaches the lower explosive limit (0.05) after 12 seconds spans only 0.5 meters, indicating a limited diffusion range. Conversely, in the case of large hole leaks, due to the presence of high-speed jet flow (259m/s) and emergency ventilation (12 times/h), an explosion hazard zone of 15 meters in length can be formed within just 11 seconds, covering a broader area. The optimization results of actual gas leak detectors indicate that, with a horizontal spacing of 15 meters, the most unfavorable alarm time for large hole leaks is 4.25 seconds, which complies with specifications, albeit a denser layout is recommended. The difference in alarm time between installation at a vertical distance of 0.3 meters from the top and installation at the top is less than 0.3 seconds, aligning with current standard specifications. The research findings provide a reliable foundation for the design of gas safety in comprehensive utility tunnels and establish an optimized basis for the arrangement of gas leak detectors.

Keywords

Computational Fluid Dynamics, Integrated Pipe Gallery, Gas Cabin, Gas Pipeline, Leakage and Diffusion Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

综合管廊作为现代城市基础设施的重要组成部分,集成了电力、通信、供水、燃气等多种管线,提高了城市空间的利用率和管理效率[1]。燃气管道在综合管廊内的安全运行面临着独特的挑战,一旦燃气管道发生泄漏,尤其是在相对封闭的燃气舱内,极易形成爆炸性混合气体,引发严重的安全事故[2][3]。对综合管廊燃气舱内的燃气泄漏扩散进行深入研究,对于保障城市安全具有重要意义。

燃气泄漏根据泄漏孔径的大小,通常可分为小孔泄漏和大孔泄漏两种情况[4]。小孔泄漏通常由管道腐蚀、老化等因素引起,泄漏速率较慢,但持续时间长,易于在密闭空间内积聚,形成潜在的爆炸风险[5][6]。大孔泄漏则通常由外力破坏、管道断裂等突发事件导致,泄漏速率极快,短时间内即可形成大范围的爆炸性气体云,危险性极高[7][8]。针对不同类型的泄漏,采取相应的安全风险评估和控制措施至关重要[9]。

计算流体力学(CFD)作为一种强大的数值模拟工具,能够精确模拟复杂环境下的气体流动、扩散和混合过程,为燃气泄漏扩散研究提供了有效的手段[10]-[12]。通过CFD模拟,可以深入了解燃气在综合管廊燃气舱内的扩散规律,分析不同泄漏情景下的气体浓度分布、爆炸性气体云的形成及发展过程,为安全风险评估和应急预案制定提供科学依据[13]-[15]。

传统的燃气管道通常独立敷设,维护和管理难度较大[16]。将燃气管道纳入综合管廊,能够实现集约化管理,提高空间利用率[17]。地下综合管廊通常为封闭或半封闭空间,一旦发生燃气泄漏,易导致气体聚集,通风不良会加剧这一问题,从而增加爆炸的风险。因此研究综合管廊内燃气泄漏后的扩散规律,对保障管廊安全至关重要。

本研究利用CFD技术,针对综合管廊燃气舱内的小孔泄漏和大孔泄漏两种典型工况,建立燃气泄漏扩散模型,分析泄漏孔径、泄漏压力、通风条件等因素对燃气扩散特性的影响。通过模拟结果,揭示燃

气在燃气舱内的扩散规律和爆炸风险，为综合管廊燃气管道的安全运行提供理论指导和技术支持。并且探讨了不同通风策略对燃气扩散的抑制效果，为优化通风设计、降低爆炸风险提供参考。

2. 研究方法

2.1. CFD 模拟设置

2.1.1 物理模型及网格划分

针对长度为 200 米的燃气舱防火分区建立模型，燃气舱截面尺寸为 $2\text{ m} \times 3\text{ m}$ ，内部燃气管道直径 400 mm，材质为无缝钢管。基于规范，未配置检修车间时，设定 $a_1 = 600\text{ mm}$ ， $a_2 = 1000\text{ mm}$ ， $b_1 = 500\text{ mm}$ 。利用 FLACS 软件的 CASD 模块构建燃气舱物理模型，送风口和回风口尺寸均为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ，分别位于防火分区顶部两侧，考虑到 FLACS 软件对边界条件的限制，模型中送风口位于防火分区一侧顶部，回风口则位于另一侧防火墙上。气体泄漏检测装置位于距顶部 0.3 m 处。为适应 FLACS 软件对燃料区域的要求，管道中燃气被近似为截面 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 、长度 200 m 的方形燃料区域。其模型如图 1(a)。燃气舱网格划分需平衡精度与效率：初始均匀布网，泄漏口因高速射流压力梯度大而局部加密如图 1(b)。



Figure 1. Gas cabin model diagram and grid division example
图 1. 燃气舱模型图及网格划分示例

2.1.2. 参数设置

(1) 初始条件

廊内天然气泄漏扩散的初始条件： $t = 0$ 时，舱室壁面和管道外表面之间充满空气，此时舱室内天然气浓度为 0，各点流速为 0，压力为大气压力。

(2) 边界条件

管道中流体泄漏过程中，由于泄漏速度十分迅速，可以将过程看作绝热过程。对小孔泄漏和大孔泄漏扩散进行模拟，其泄漏示意图如图 2，图中 1 点表示燃气管道起点位置的管道中心线上的点，2 点为泄漏口处管道中心线上的点，0 点表示泄漏口处的状态点。其中 P_0 、 T_0 、 u_0 、 ρ_0 分别代表 0 点的压力、温度、流速和密度。

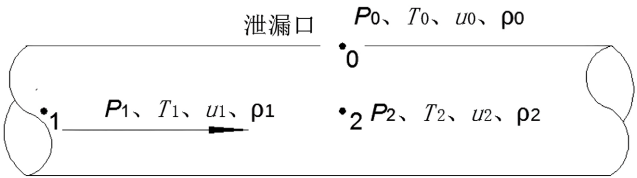


Figure 2. Schematic diagram of gas pipeline leakage
图 2. 燃气管道泄漏示意图

以燃气舱的送风口和泄漏口作为进口边界条件，回风口作为出口边界条件，以综合管廊壁面条件为壁面边界条件。泄漏口处设置燃气的温度，水力直径以及紊流强度。进风口处设置为速度入口。回风口设为压力出口，设置该边界条件下的静压。其边界条件汇总如表 1。

Table 1. Summary of boundary conditions**表 1.** 边界条件汇总表

序号	边界类型	边界条件	设置值
1	送风口	速度入口	速度、温度、水力直径、紊流强度
2	回风口	压力出口	静压
3	燃气管道泄漏口	速度入口	速度、温度、水力直径、紊流强度
4	燃气舱内壁	壁面边界条件	壁面粗糙度

对于在不同换气次数下送风风速的计算:

$$v = \frac{200 \times (2 \times 3 - 0.4 \times 0.4) \cdot L}{3600 \cdot A} \quad (1)$$

式中

v ——送风口风速(m/s);

L ——通风换气次数(次/h);

A ——送风口面积(m²)。

不同通风换气次数转换为进风口风速如表 2。

Table 2. Inlet wind speed**表 2.** 进风口风速

换气次数(次/小时)	风速(m/s)
0	0
6	1.47
12	2.93

对于泄漏速度的计算:

1) 小孔泄漏

当泄漏孔径为小孔时, 将流体看作一元流动, 燃气近似看作理想气体。则其满足如下方程:

$$\frac{\partial P}{\rho} = u du \quad (2)$$

$$\frac{P}{\rho} = RT \quad (3)$$

$$\frac{P}{\rho^k} = \text{const} \quad (4)$$

式中

P ——燃气压力, pa;

R ——天然气气体常数(519 J/(kg·k));

T ——燃气温度, K;

k ——天然气的绝热指数, 1.29;

u ——断面流速, m/s;

ρ ——燃气密度(kg/m^3)。

联立以上方程, 求解出泄漏口处的流速为:

$$u_0 = \sqrt{\frac{P_2}{\rho} \cdot \frac{2k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (5)$$

计算临界压力比, 可以判断泄漏时燃气属于临界流动还是亚临界流动。

$$CPR = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (6)$$

当 $P_0/P_2 < CPR$ 时, 流体泄漏速度达到音速, 化简后得到泄漏速度为:

$$u_0 = \sqrt{k \cdot \frac{ZRT_2}{M} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}} \quad (7)$$

当 $P_0/P_2 > CPR$ 时, 泄漏口处的流动处于亚临界流动时, 其泄漏口处的流速为临界流速:

$$u_0 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{ZRT_2}{M} \cdot \left[\left(\frac{P_0}{P_2} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_0}{P_2} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (8)$$

2) 大孔泄漏

当天然气流动过程满足下式时, 燃气泄漏口处为亚临界流动:

$$\begin{cases} P_2 > P_1 \cdot Ma_1 \cdot \sqrt{\frac{2 + (k-1) \cdot Ma_1^2}{k+1}} \\ \frac{P_a}{P_2} \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases} \quad (9)$$

此时泄漏速率公式如式 9。

当天然气流动过程满足下式时, 燃气泄漏口处为临界流动:

$$\begin{cases} P_2 < P_1 \cdot Ma_1 \cdot \sqrt{\frac{2 + (k-1) \cdot Ma_1^2}{k+1}} \\ \frac{P_a}{P_2} \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases} \quad (10)$$

此时泄漏速率公式如式 10。

本文参考 JTJ026《公路隧道通风照明设计规范》中对平均壁面粗糙度的要求, 选取壁面粗糙度为 0.5。

2.2. CFD 模拟结果

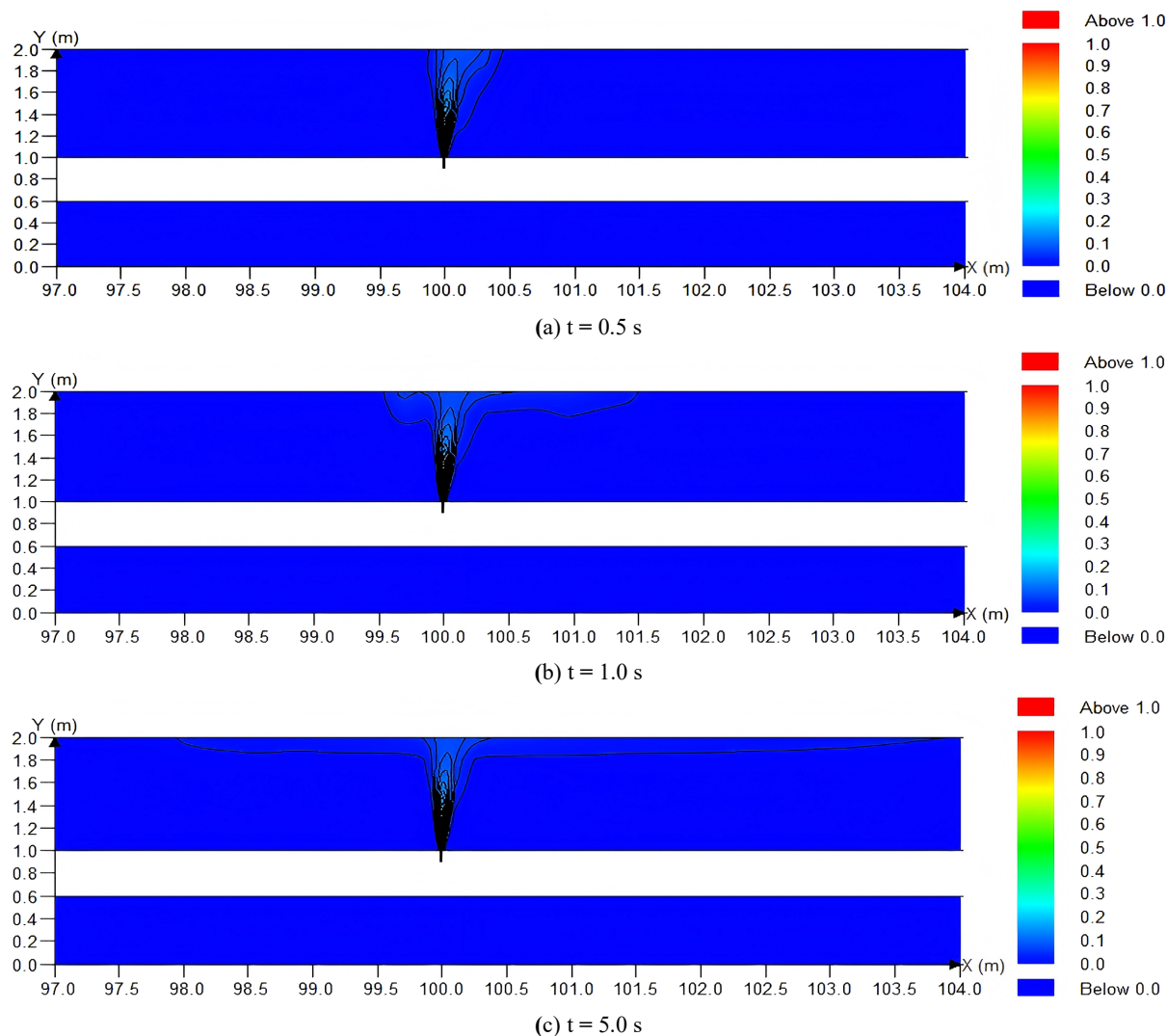
2.2.1. 小孔泄漏

当泄漏口孔径为 15 mm 时, 泄漏出的燃气达到临界状态, 计算得泄漏口处流速为 259 m/s。通风条件为正常通风, 即通风换气次数为 6 次/小时, 换算出的送风风速为 1.47 m/s。将以上边界条件参数输入 FLACS 软件的前置处理单元 CASD 后进行网格划分, 其网格划分结果如表 3。

Table 3. Grid division results of small hole leakage simulation**表 3.** 小孔泄漏模拟网格划分结果

方向 \ 参数	X	Y	Z
控制体数量	261	26	44
最小控制体尺寸(m)	0.01	0.05	0.01
最大控制体尺寸(m)	1	0.1	0.1
最大差异率	400.01	100.00	400.00
控制体总数		298,584	
最大纵横比		100.0	

利用 FLACS 软件首先对通风稳定后的流场进行模拟, 0.3 s 后流场稳定, 得到正常通风时流场内各点的状态。再开始模拟管道发生泄漏后的气云扩散。模拟出在 $Z=0.855$ m 时的 X - Y 截面天然气浓度分布分别在 0.5 s, 1.0 s, 5.0 s, 12.0 s 的云图如图 4 所示。图中等浓度线代表的最小浓度值为 0.01。



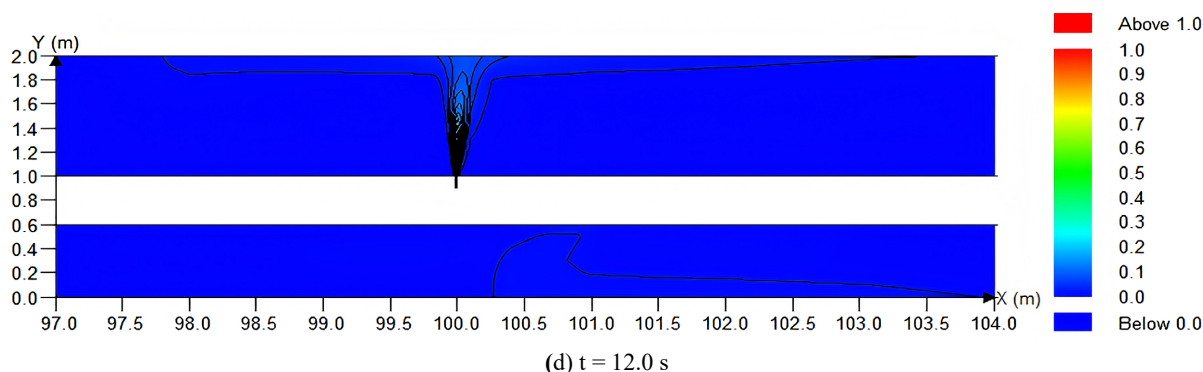


Figure 3. Cloud map of natural gas concentration distribution in the X - Y plane at various times after the occurrence of small hole leakage

图 3. 小孔泄漏发生后各时刻在 X - Y 平面的天然气浓度分布云图

小孔泄漏发生 0.5 s 时, 泄漏出的气体总量较少, 送风气流使得气体射流向回风口方向偏转。

小孔泄漏发生 1.0 s 时, 泄漏出的气体一部分贴附在管廊壁面, 气流开始向两端扩散。泄漏出的气体呈现出明显的泄漏口上风向少, 下风向多的特点。

小孔泄漏发生 5.0 s 时, 此时天然气浓度达到 0.01 的区域长度有 6 米, 泄漏口上风向有 2 米, 泄漏口下风向 4 米。

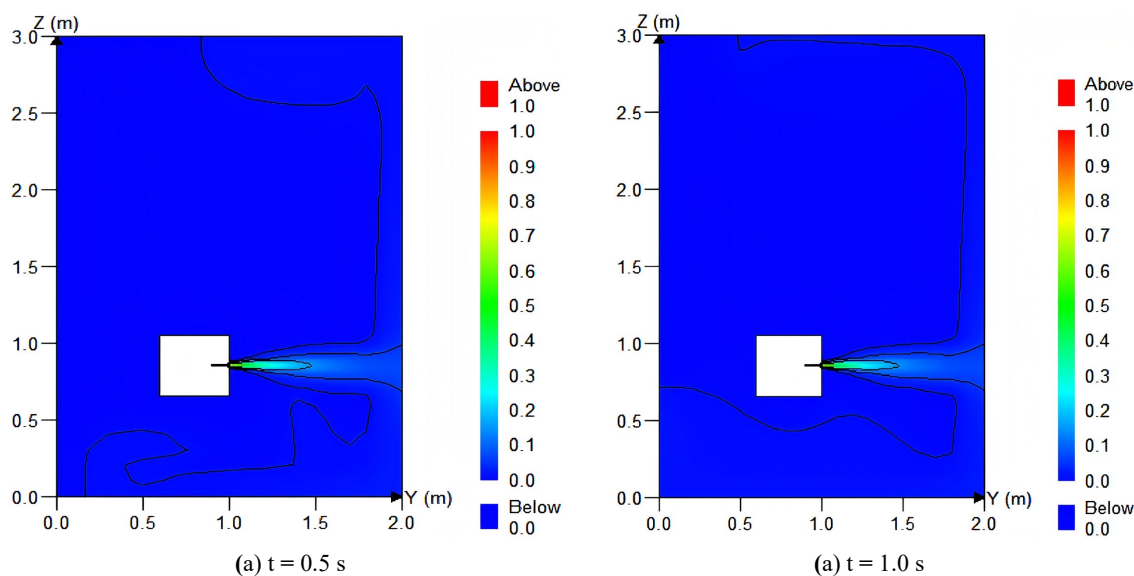
小孔泄漏发生 12.0 s 时, 泄漏出的气体迅速向射流区域外扩散, 并且气体泄漏流量较小。因此甲烷浓度达到 0.01 的区域长度有 6.5 m, 其中泄漏口上风向 2.5 m, 泄漏口下风向 4.0 m; 浓度达到爆炸下限 0.05 的气云体积仅为 0.5 米长度, 其中下游约 0.35 米, 上游约 0.15 米。

模拟出的在 $X = 99.995$ m 位置处 Y - Z 截面天然气浓度分布分别在 0.5 s, 1 s, 5 s, 12 s 的云图如图 4 所示。图中等浓度线代表的最小浓度值为 0.01。

小孔泄漏发生 0.5 s 时, 可以明显看出泄漏时的气体射流, 气流扩散到管廊壁面, 有向壁面四周扩散的趋势。

小孔泄漏发生 1.0 s 时, 气体射流贴附壁面向四周扩散, 此时天然气刚扩散到管廊 Z 轴方向的中部。

小孔泄漏发生 5.0 s 时, 气流已经扩散至管廊顶部, 由于泄漏口至管廊底端距离较短, 泄漏出的天然气管廊下方开始积聚。



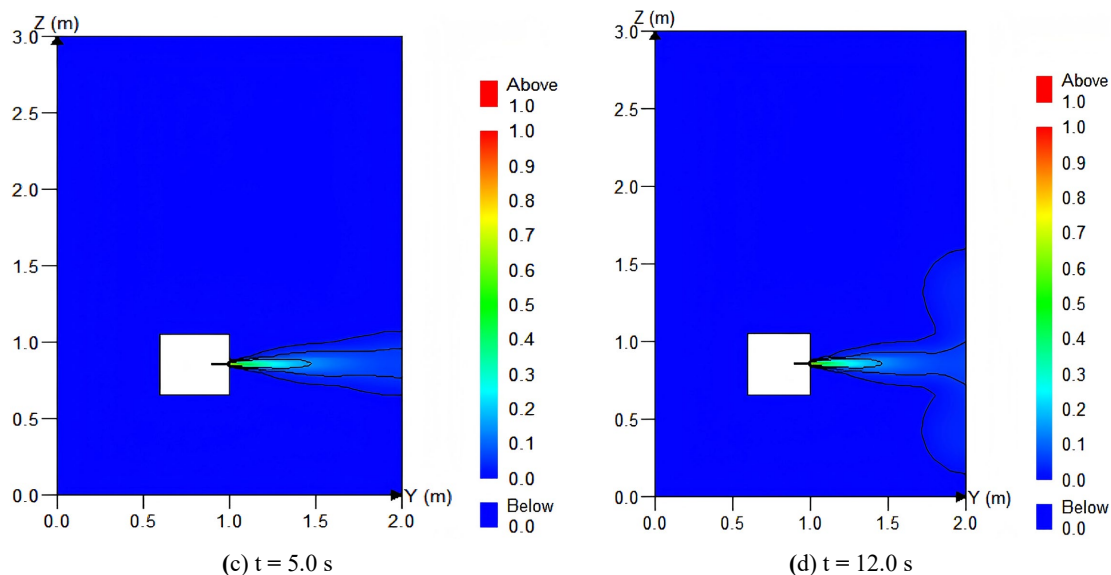


Figure 4. Cloud map of natural gas concentration distribution in the Y-Z plane at various times after the occurrence of small hole leakage

图 4. 小孔泄漏发生后各时刻在 Y-Z 平面的天然气浓度分布云

小孔泄漏发生 12.0 s 时, 此时该截面附近泄漏口下部空间的燃气体积分数基本全部达到 0.01, 但由于燃气泄漏总量小, 泄漏口上部截面燃气体积分数达到 0.01 的范围较小。总体来说, 此刻管廊截面气云达到分数体积 0.01 的面积不及管廊截面积的一半。

2.2.2. 大孔泄漏

对管道运行压力为 0.4 MPa 的天然气管道泄漏扩散进行模拟, 当泄漏口孔径为 60 mm 时, 燃气从泄漏口流出后达到临界状态, 计算出泄漏口处流速为 259 m/s。通风条件为事故通风, 即通风换气次数为 12 次/小时, 换算出的送风风速为 2.93 m/s。将以上边界条件参数输入 FLACS 软件的前处理单元 CASD 后进行网格划分, 其网格划分结果如表 4。

Table 4. Grid division results of large hole leakage simulation

表 4. 大孔泄漏模拟网格划分结果

方向 \ 参数	X	Y	Z
控制体数量	418	26	36
最小控制体尺寸(m)	0.05	0.05	0.05
最大控制体尺寸(m)	0.5	0.1	0.1
最大差异率	899.94	100.00	100.00
控制体总数		391,248	
最大纵横比		10.0	

利用 FLACS 软件首先对通风稳定后的流场进行模拟, 0.3 s 后流场稳定, 得到正常通风时流场内各点的状态。再开始模拟管道发生泄漏后的气云扩散。模拟出在 $Z = 0.83$ m 处的 X-Y 截面天然气浓度分布分别在 0.5 s, 1.0 s, 5.0 s, 11.0 s 的云图如图 5 所示。图中等浓度线代表的最小浓度值为 0.05。

大孔泄漏发生 0.5 s 时, 由于气体泄漏流量较大, 通风对瞬时的射流偏转影响不大, 气体射流未发生明显偏转。

大孔泄漏发生 1.0 s 时, 天然气贴附壁面向四周扩散, 此时天然气已经扩散至泄漏口附近 6 米范围, 气体射流在 X 方向上以泄漏口为中心比较对称。

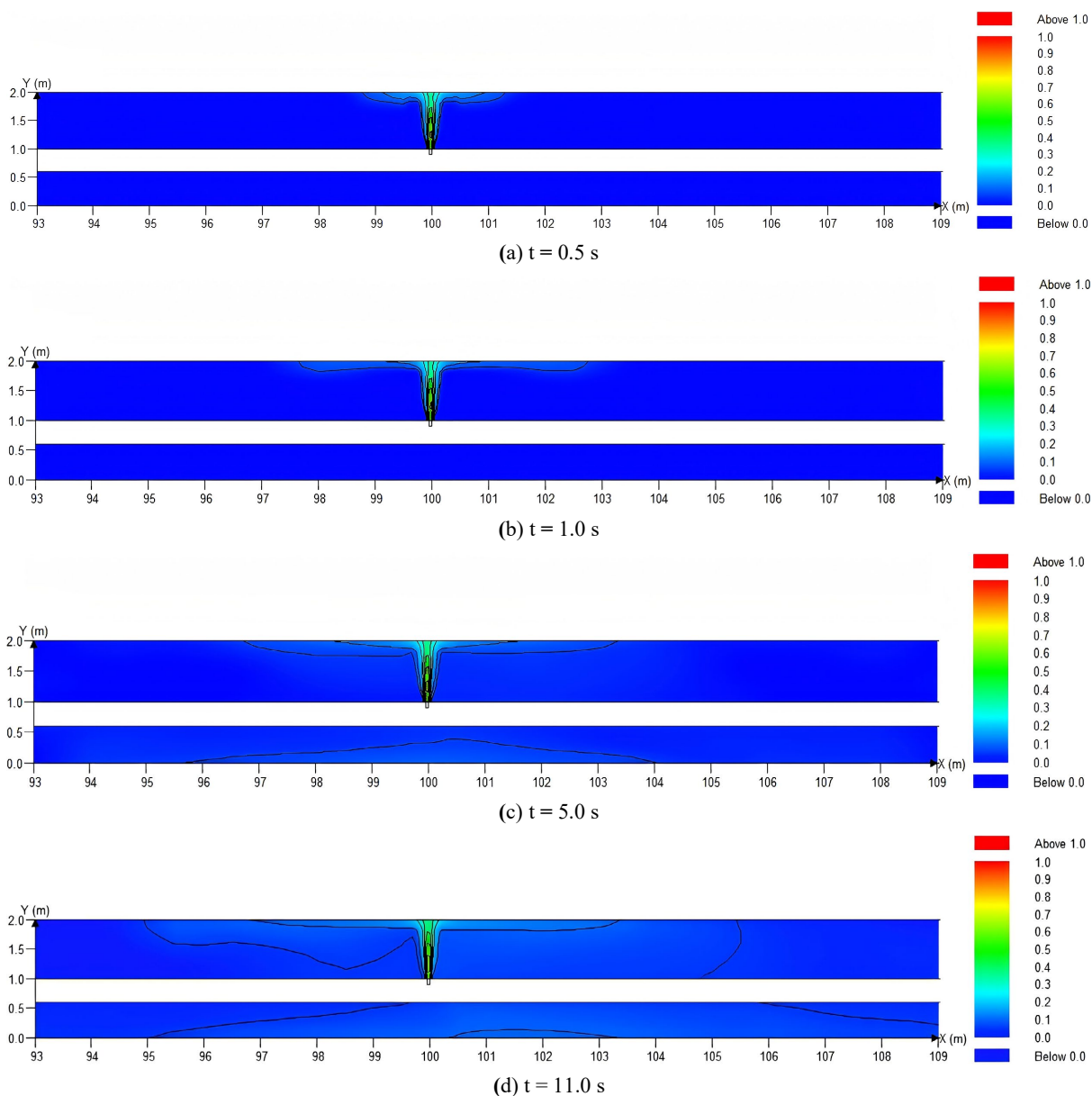


Figure 5. Cloud map of natural gas concentration distribution in the X - Y plane at various moments after large hole leakage
图 5. 大孔泄漏发生后各时刻在 X - Y 平面的天然气浓度分布云图

大孔泄漏发生 5.0 s 时, 天然气体积分数达到 0.01 的扩散长度为 8.0 米。此时管廊内充斥足够多的天然气, 重力使得一部分甲烷聚积在燃气舱底部, 可以看出泄漏口下风向天然气体积总体大于上风向的体积。

大孔泄漏发生 11.0 s 后, 送风气流使得泄漏口下风向的天然气体积大于泄漏口上风向的天然气体积, 泄漏出的天然气气体和空气混合达到爆炸下限的长度为 15.0 米, 其中泄漏口上风向 5.0 米, 泄漏口下风

向 10.0 米。达到爆炸下限的 20% 的区域长度为 24 米，其中泄漏口上风向 10.0 米，泄漏口下风向 14.0 米。

模拟出在 $X=99.97\text{ m}$ 处 X - Y 截面天然气浓度分布分别在 0.5 s, 1 s, 5 s, 12 s 的云图如图 6 所示。其中图 6(a)~(c) 等浓度线代表的最小浓度值为 0.05, 图 6(d) 的等浓度线代表的最小浓度值为 0.15。

大孔泄漏发生 0.5 s 时, 由于泄漏天然气流量较大, 此刻气体射流已经到达管廊壁面并开始向壁面四周扩散, 由于网格划分未到气体射流中心位置, 图中可视的气云最大浓度仅为 0.7。

大孔泄漏发生 1.0 s 时, 气云扩散十分迅速, 泄漏出的天然气已经扩散至燃气舱顶部, 泄漏口下端气云开始积聚。

大孔泄漏发生 5.0 s 时, 该位置处管廊壁面截面附近有大约半数的气云浓度达到 0.05, 即达到爆炸下限浓度。

大孔泄漏发生 11.0 s 后, 此时该位置处截面附近气云浓度基本全部达到 0.05, 形成柱状可燃气云。

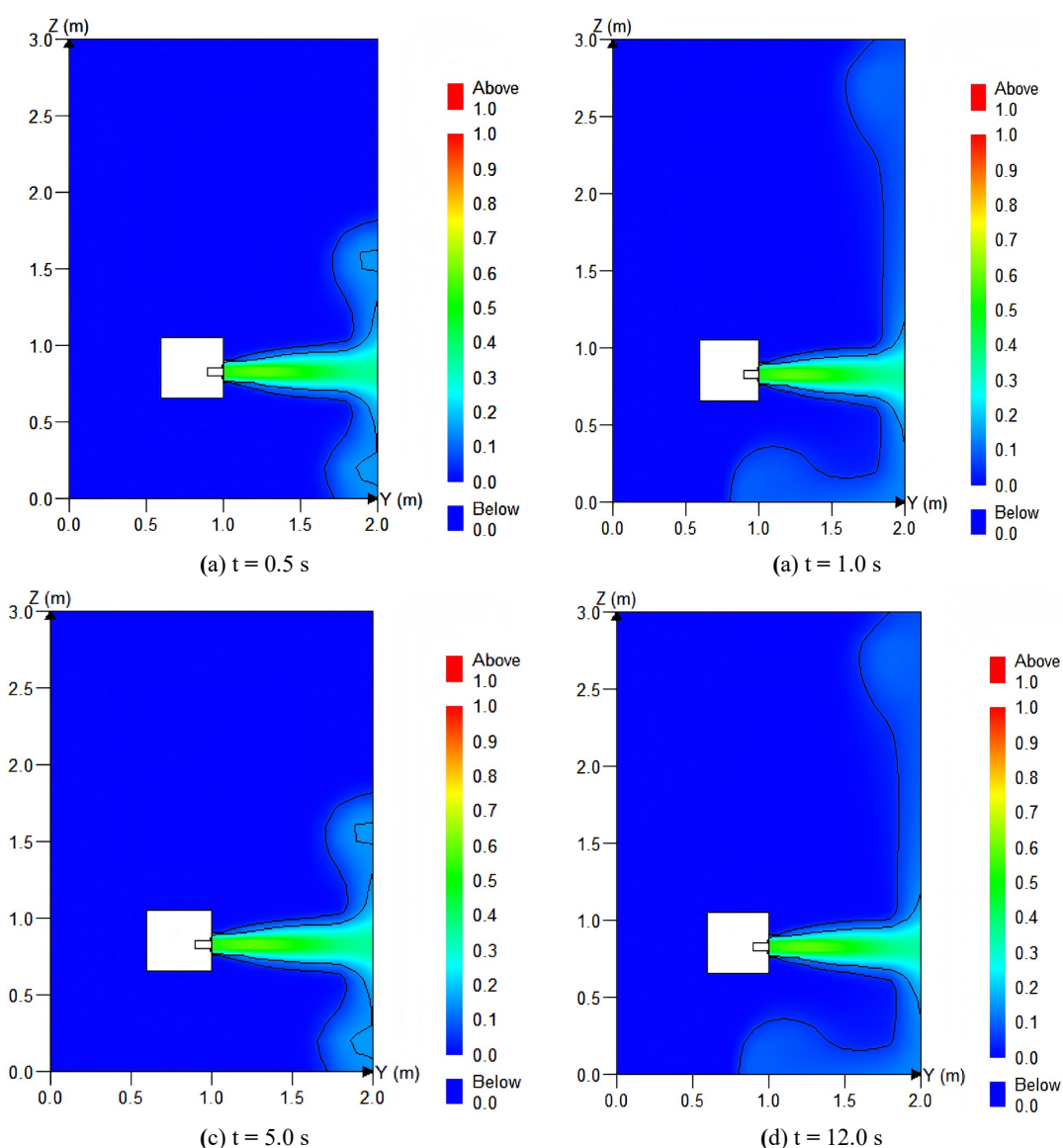


Figure 6. Cloud map of natural gas concentration distribution in the Y - Z plane at various moments after large hole leakage
图 6. 大孔泄漏发生后各时刻在 Y - Z 平面的天然气浓度分布云图

2.3. 气体探测器位置优化

2.3.1. 水平间距

根据规范中有关气体检测装置的设置要求,燃气舱每隔 15 米设置一个可燃气体探测器。而燃气管道的泄漏口可能出现在任何位置,在不考虑通风的情况下,可以认为,当泄漏口位于两个可燃气体探测器中间时是最不利的;当泄漏口恰好位于某可燃气体探测器下方时是最有利的,此时探测器可以迅速感应到气体的泄漏。通风 0.3 s 后开始发生泄漏,通过模拟分别得出小孔泄漏和大孔泄漏时,两种情况下气体探测器处燃气浓度随时间变化规律。本研究在燃气舱距顶 0.3 m 处,每隔 15 m 设置一个可燃气体探测器。

发生小孔泄漏时,在最有利的条件下,泄漏点位于可燃气体探测器的正下方。此时可燃气体探测器处天然气浓度随时间变化曲线如图 7。

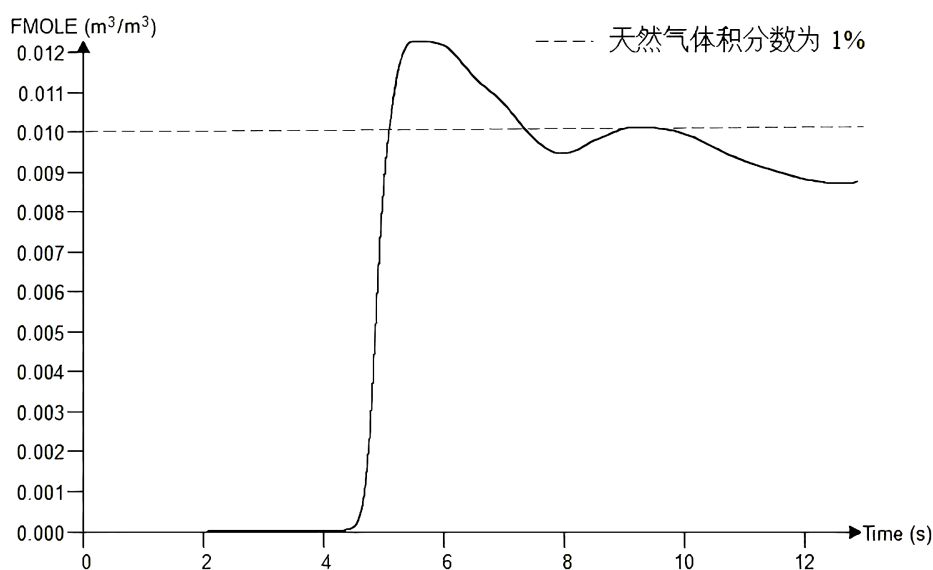


Figure 7. Time varying curve of natural gas concentration at the combustible gas detector position directly above the leakage port (small hole leakage)

图 7. 在泄漏口正上方的可燃气体探测器位置处天然气浓度随时间变化曲线(小孔泄漏)

由图 7 可知,可燃气体探测器位于泄漏口正上方时,泄漏发生 4.4 s 后该位置处燃气浓度迅速升高,至 4.4 s 即达到天然气爆炸下限的 20%,即 4.4 s 时发出燃气泄漏报警信号。

发生小孔泄漏时,在最不利的情况下,泄漏点正好位于两个可燃气体探测器的中点的下方。此时可燃气体探测器处天然气浓度随时间变化曲线如图 8。

由图 8 可知,当发生小孔泄漏,可燃气体探测器位于泄漏口下游 7.5 m 时,该处燃气浓度在 8.0 s 之后迅速上升至 0.3% 的浓度,但是在泄漏发生后 12 秒钟内均没有达到 1% 的浓度,没有发出泄漏报警信号。

发生大孔泄漏时,在最有利的条件下,泄漏点位于可燃气体探测器的正下方。此时可燃气体探测器处天然气浓度随时间变化曲线如图 9。

由图 10 可知,发生大孔泄漏,当泄漏点正好位于两个可燃气体探测器的中点的下方时,从泄漏开始到可燃气体探测器报警的时间为 1.75 s,几乎同一时刻浓度迅速上升到燃气爆炸下限。

在最不利的情况下,泄漏点正好位于两个可燃气体探测器的中点的下方。此时泄漏口下风处可燃气体探测器处天然气浓度随时间变化曲线如图 10。

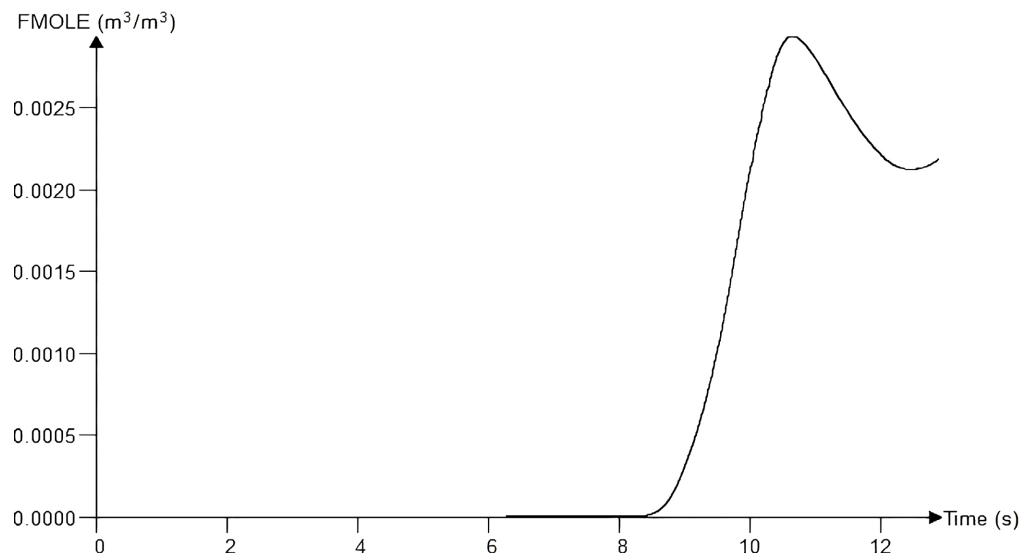


Figure 8. Time varying curve of natural gas concentration at the combustible gas detector position 7.5 m downstream of the leakage port (small hole leakage)

图 8. 在泄漏口下游 7.5 m 的可燃气体探测器位置处天然气浓度随时间变化曲线(小孔泄漏)

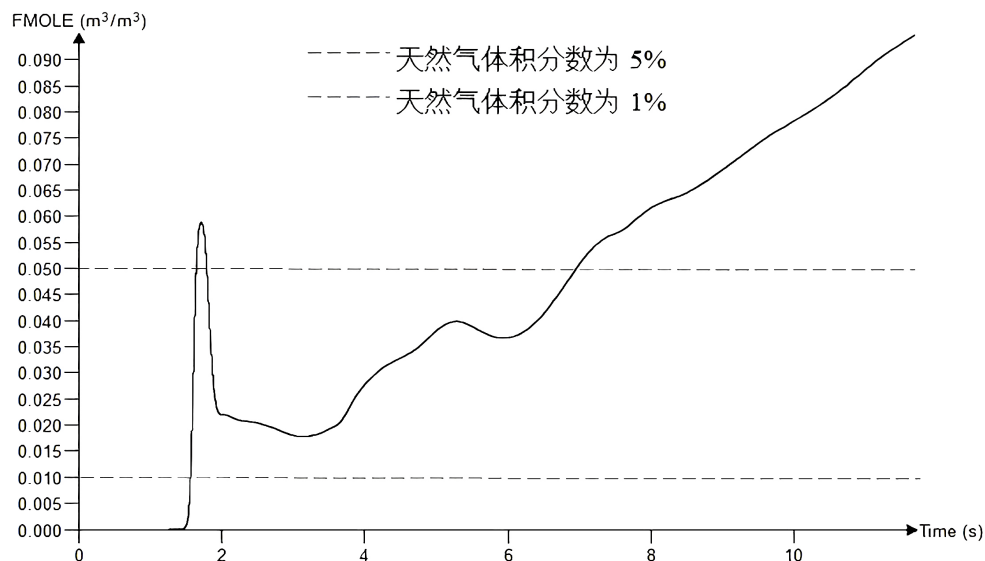


Figure 9. Time varying curve of natural gas concentration at the combustible gas detector position directly above the leakage port (large hole leakage)

图 9. 在泄漏口正上方的可燃气体探测器位置处天然气浓度随时间变化曲线(大孔泄漏)

由图 10 可见, 发生大孔泄漏, 当可燃气体探测器位于泄漏点的下风向 7.5 m 处, 从泄漏开始到可燃气体探测器报警的时间为 4.25 s。

根据模拟结果, 可燃气体泄漏探测器报警浓度设置对报警时间的影响不大, 因此规范规定以燃气爆炸下限的 20% 作为报警浓度是合理的。

由于发生小孔泄漏后, 气云积聚体积较小, 虽然泄漏报警时间较长, 但总体危害较小。仅仅看大孔泄漏的情况, 在最不利条件下, 泄漏报警时间最多为 4.25 s, 可以得出燃气舱气体监测设备布置间距为 15 m 是较合理的。但为了增强可靠性, 在经济条件允许的情况下, 也可以将布置间距缩短。

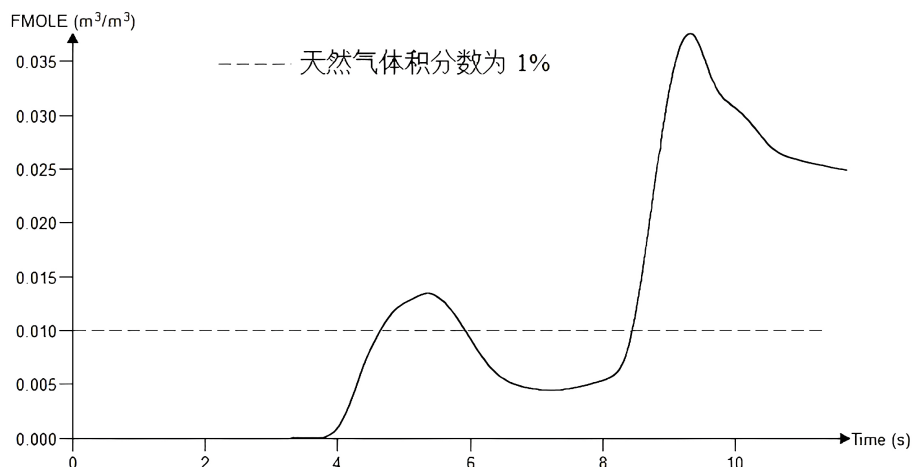


Figure 10. Time varying curve of natural gas concentration at the combustible gas detector position 7.5 m downwind from the leakage port (large hole leakage)

图 10. 在泄漏口下风向 7.5 m 的可燃气体探测器位置处天然气浓度随时间变化曲线(大孔泄漏)

2.3.2. 距顶高度

标准图集 18GL502《综合管廊燃气管道舱室配套设计与施工》中规定,可燃气体探测器布置在距燃气舱顶部 0.3 m 的位置,然而气体发生泄漏之后,会贴附舱室顶部流动,可能会导致气体监测报警的延迟。

发生大孔泄漏时,分别在最不利和最有利条件下设置可燃气体探测器在燃气舱的顶部和距燃气舱顶部 0.3 m 处。模拟得到在燃气舱顶部和燃气舱顶部 0.3 m 时,探测器位置处燃气浓度随时间变化曲线图如图 11 和图 12。

将探测器设置在燃气舱室的顶部时,泄漏报警时间为 1.54 s;将探测器设置在距燃气舱顶部 0.3 m 处,泄漏报警时间为 1.56 s。

将探测器设置在燃气舱室的顶部时,泄漏报警时间为 4.29 s;将探测器设置在距燃气舱顶部 0.3 m 处,泄漏报警时间为 4.63 s。

可以得出将探测器设置在燃气舱顶部位置相比设在距顶 0.3 m 处可以更快地进行报警,但是整体影响不大,所以可忽略探测器设置高度的影响。

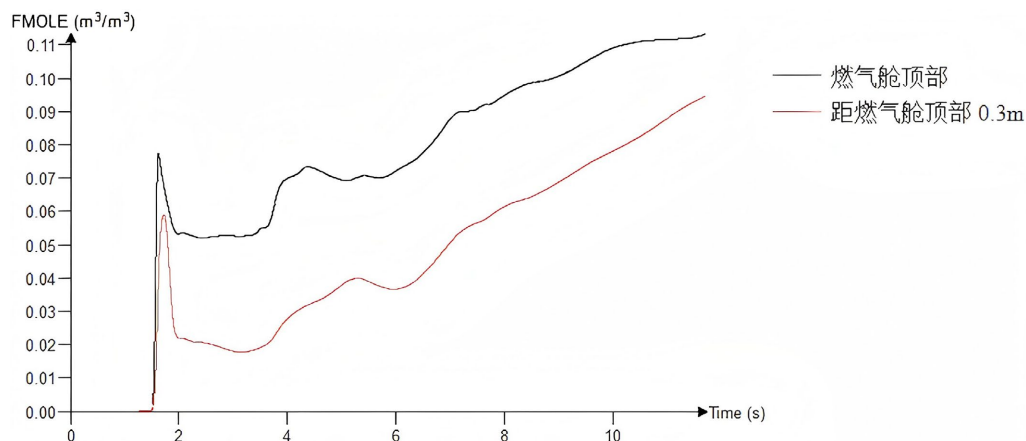


Figure 11. Gas concentration variation diagram of the detector located directly above the leakage port at the top of the gas chamber and 0.3 m away from the top

图 11. 在泄漏口正上方的探测器位于燃气舱顶部和距顶 0.3 m 处燃气浓度变化图

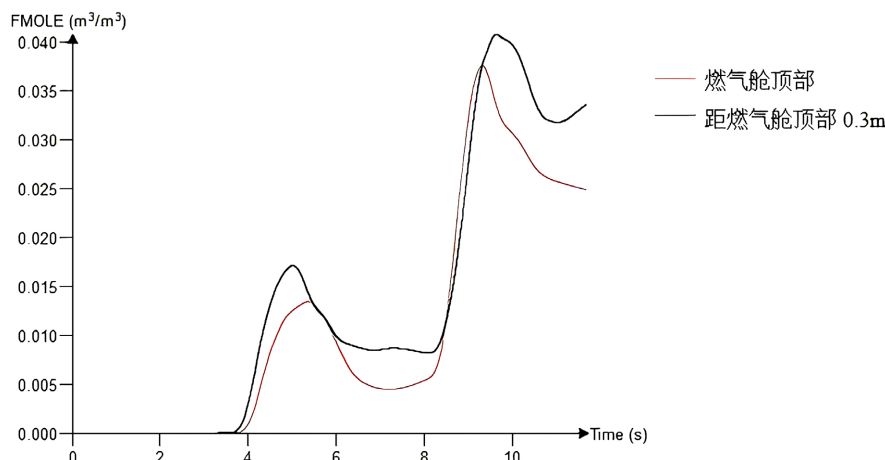


Figure 12. Gas concentration variation diagram of the detector located 7.5 m downstream of the leakage port at the top of the gas chamber and 0.3 m away from the top

图 12. 在泄漏口下游 7.5 m 的探测器位于燃气舱顶部和距顶 0.3 m 处燃气浓度变化图

3. 结论与展望

3.1. 结论

1) 小孔泄漏(15 mm): 因泄漏流量小(流速 259 m/s), 12 秒后甲烷浓度达爆炸下限(5%)的区域仅 0.5 米, 扩散范围有限, 爆炸风险较低。大孔泄漏(60 mm): 高速射流(259 m/s)叠加事故通风(12 次/h), 11 秒即可形成 15 米长的爆炸危险区(浓度 $\geq 5\%$), 覆盖燃气舱全截面, 危险性极高。

2) 水平间距: 15 米间距下, 大孔泄漏最不利报警时间为 4.25 秒, 符合规范要求, 但建议经济允许时加密布置以提升可靠性。

3) 竖直高度: 探测器距顶 0.3 m 与顶部安装的报警时间差异不足 0.3 秒, 验证现行标准(距顶 0.3 m)的合理性, 高度影响可忽略。

4) FLACS 软件精准复现了燃气在封闭舱室内的扩散动力学行为(如射流偏转、贴壁扩散、重力积聚), 为安全设计提供可靠依据。

3.2. 展望

1) 多因素耦合模拟深化: 增加实际场景变量(如多泄漏点、管道弯头/阀门泄漏、温度梯度影响), 探究复杂条件下的扩散规律。研究不同通风模式(如间歇通风、局部增压通风)对燃气积聚的抑制效果。

2) 探测器布设策略优化: 量化分析加密间距(如 10 m)对报警时效的提升效益, 制定经济性与安全性平衡的布设标准。探索探测器网络联动算法, 实现泄漏源快速定位与智能关断。

3) 灾害链演化机制研究: 模拟燃气积聚至爆炸的全过程(如点火源位置对爆轰波传播的影响), 评估次生灾害风险。结合结构力学模型, 研究爆炸冲击波对管廊结构的破坏阈值。

4) 智能监测技术集成: 开发基于 CFD 数据的数字孪生系统, 实时预测泄漏扩散路径并动态调整通风策略, 融合物联网传感器与机器学习算法。

参考文献

- [1] 黄钺. 基于 BP 神经网络的综合管廊施工进度预测[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(1): 40-42.
- [2] 焦一飞, 曾文慧, 刘晓宇, 等. 综合管廊燃气爆炸冲击波超压演化及火焰传播特征[J]. 工程爆破, 2024, 30(4): 34-41.

- [3] Bai, Y., Wu, J., Yuan, S., Reniers, G., Yang, M. and Cai, J. (2022) Dynamic Resilience Assessment and Emergency Strategy Optimization of Natural Gas Compartments in Utility Tunnels. *Process Safety and Environmental Protection*, **165**, 114-125. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.07.008>
- [4] 张惠智, 樊宇姣, 贾嵘, 等. 计及天然气管道泄漏的电-气综合能源系统潮流计算方法[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 4829-4838.
- [5] Liu, C., An, J., Xie, C., Wu, H. and Zhang, Z. (2024) Numerical Simulation-Based Pinhole Leakage Characteristics and Hazard Boundaries of Buried Natural Gas Risers. *Process Safety and Environmental Protection*, **184**, 462-476. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.02.011>
- [6] Zhang, S., Li, J., Wang, X. and Zhang, J. (2025) Study on Horizontal Leakage Diffusion Characteristics of Small and Medium Aperture in High-Pressure Natural Gas Pipelines with Large Open Spaces. *ACS Omega*, **10**, 10515-10529. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c10797>
- [7] Garg, K., Singh, S., Rokade, M. and Singh, S. (2023) Experimental and Computational Fluid Dynamic (CFD) Simulation of Leak Shapes and Sizes for Gas Pipeline. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **84**, Article ID: 105112. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105112>
- [8] Liao, K., Wang, Y., Chen, D., He, G., Huang, Y., Zhang, S., *et al.* (2023) Parametric Study on Natural Gas Leakage and Diffusion in Tunnels. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, **14**, Article ID: 04023003. <https://doi.org/10.1061/jpsea2.pseng-1396>
- [9] Charani Shandiz, S., Foliente, G., Rismanchi, B., Wachtel, A. and Jeffers, R.F. (2020) Resilience Framework and Metrics for Energy Master Planning of Communities. *Energy*, **203**, Article ID: 117856. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117856>
- [10] Kong, C., Zhang, D., Cai, R., Li, S. and Zhu, R. (2020) Numerical Simulation and Analysis of Diffusion Process for the Leakages of a Tunnel LNG Pipeline. *Geofluids*, **2020**, Article ID: 8894047. <https://doi.org/10.1155/2020/8894047>
- [11] 陈子烁, 曾胜. 基于 CFD 的封闭空间内氢气泄漏质量流量估计及泄漏点定位方法研究[J]. 自动化应用, 2025, 66(5): 135-139+142.
- [12] 焦振涛, 赵建平. CNG 长管拖车隧道泄漏扩散 CFD 仿真研究[J]. 工业安全与环保, 2020, 46(9): 16-19+47.
- [13] Wu, L., Qiao, L., Fan, J., Wen, J., Zhang, Y. and Jar, B. (2024) Investigation on Natural Gas Leakage and Diffusion Characteristics Based on CFD. *Gas Science and Engineering*, **123**, Article ID: 205238. <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2024.205238>
- [14] Zhang, P. and Lan, H. (2020) Effects of Ventilation on Leakage and Diffusion Law of Gas Pipeline in Utility Tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **105**, Article ID: 103557. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103557>
- [15] Wang, X., Tan, Y., Zhang, T., Zhang, J. and Yu, K. (2020) Diffusion Process Simulation and Ventilation Strategy for Small-Hole Natural Gas Leakage in Utility Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **97**, Article ID: 103276. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103276>
- [16] 芦亚男. 基于物联网的城镇燃气管道第三方破坏实时预警技术研究[J]. 中国设备工程, 2025(10): 208-210.
- [17] 华东, 欧阳康森. 小型综合管廊与地下管线治理融合发展策略研究[J]. 城市管理与科技, 2023, 24(6): 33-36.