

文章编号: 1671-6612 (2022) 04-551-05

综合管廊截面形式对燃气扩散规律影响研究

夏海林 邓志辉

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 利用 Fluent 建立数值模型, 模拟计算在不同的截面面积和宽高比下综合管廊内燃气泄漏扩散规律。结果表明: 同一泄漏量下, 截面面积主要影响管廊内燃气整体浓度分布, 截面宽高比主要影响泄漏口附近燃气浓度与截面的最大浓度; 截面面积与燃气扩散速度呈负相关关系, 截面宽高比对燃气扩散速度影响不大; 通风能有效稀释燃气浓度, 截面形式会影响管廊内的通风稀释效果; 综合管廊截面面积越小、宽高比越大, 危险性越大, 通风稀释需要的通风量越大。

【关键词】 综合管廊; 数值模拟; 截面形式; 泄漏扩散

中图分类号 X932 文献标识码 A

Influence of Cross Section form on Natural Gas Leakage and Diffusion in Natural Gas Pipeline Cabin of Utility Tunnel

Xia Hailin Deng Zhihui

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Using the Fluent to establish a numerical model to simulate and calculate the gas diffusion law in the urban utility tunnel under different cross section areas and aspect ratio. The results show that, under the same leakage rate, the cross section area mainly affects the overall gas concentration distribution in the tunnel, and the section aspect ratio mainly affects the gas concentration near the leakage outlet and the maximum concentration of the cross section. There is a negative correlation between the cross section area and gas diffusion velocity, and the cross aspect ratio has little effect on gas diffusion velocity. Ventilation can effectively dilute the gas concentration, and the cross-section will affect the ventilation dilution effect. The smaller the cross section area of the tunnel, the greater the ratio of width to height, the greater the risk, and the greater the ventilation volume required for ventilation dilution.

【Keywords】 utility tunnel; numerical simulation; cross section form; leakage and diffusion

作者简介: 夏海林 (1997-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 15138033952@163.com

通讯作者: 邓志辉 (1962-), 男, 硕士, 副教授, E-mail: dzhwkloo7@163.com

收稿日期: 2021-12-14

0 引言

综合管廊是集中了电力、通信、燃气、供热等工程管线的地下隧道, 在现代化城市发展中发挥巨大的作用^[1]。其中燃气舱是专门用于容纳天然气管道的舱室, 由于燃气舱是密闭空间, 而燃气又具有易燃易爆的特点, 一旦发生泄漏后果不堪设想^[2], 因此关于燃气舱燃气泄漏扩散规律的研究至关重要。

近年来, 多位学者针对燃气舱内天然气泄漏扩散问题进行了大量研究。方自虎^[3]对比综合管廊内燃气泄漏实验研究和数值模拟的结果, 证明了数值模拟的可靠性; 王雪梅等^[4-6]建立了二维燃气舱模型, 研究了不同泄漏孔径、通风条件及泄漏速度对燃气扩散的影响; Ping Zhang^[7]模拟了不同通风速度和通风口尺寸对燃气扩散的影响, 提出了适合燃气排出的最佳通风风速及通风口尺寸; 吴欢^[8]研究

了在最不利泄漏口条件下的事故通风方案,发现一进一排的通风方式要优于一进两排的通风方式;上述研究多针对泄漏口边界条件和通风条件进行研究,而忽略了管廊截面形式对燃气扩散规律的影响。

本文采用数值模拟的方法建立燃气舱的三维模型,研究管廊截面形式对燃气泄漏扩散规律的影响,为综合管廊燃气舱室的安全运行提供参考。

1 计算模型及边界条件

1.1 物理模型

以某地下综合管廊天然气舱内一段独立的防火分区作为研究对象,其纵向长度 200m。送、排风口位于燃气舱两端,尺寸均为 1m×1m。内部容纳输送压力 0.8MPa、管径 400mm 的天然气管道,简化的物理模型如图 1 所示。

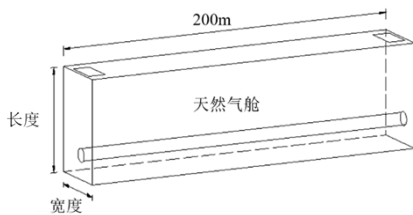


图 1 天然气舱室几何模型

Fig.1 Geometry model diagram of natural gas compartments

1.2 数学模型及模型简化

流体流动遵守三大基本守恒定律:质量、动量和能量守恒定律,天然气的泄漏扩散还需遵守气体组分质量守恒定律。

质量守恒定律:

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

式中: ρ 为密度; t 为时间; u_i 为流体速度。

动量守恒方程:

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

式中: P 为压强; μ 为流体湍流粘度; g 为加速度分量。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \text{div}(\rho u_i T) = \text{div} \left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T \right) + S_r \quad (3)$$

式中: k 为流体传热系数; T 为绝对温度; S_r 为粘性耗散。

组分输运方程:

$$\frac{\partial(\rho m_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mu m_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v m_i)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w m_i)}{\partial z} \quad (4)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left[\Gamma_i \frac{\partial m_i}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\Gamma_i \frac{\partial m_i}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\Gamma_i \frac{\partial m_i}{\partial z} \right]$$

式中: m_i 为不同组分所占的质量比例; Γ_i 为湍流扩散系数。

本文使用 Fluent 建立模型,为简化计算过程,在满足工程精度的基础上对管廊模型进行适当简化,具体假设如下:

(1) 假设泄漏天然气全部为甲烷,其他成分忽略不计,泄漏气体为可压缩性理想气体,气体间不发生化学反应。

(2) 天然气泄漏时视为连续的稳态泄漏,泄漏面积不随时间发生变化。

1.3 模型设定及边界条件

Fluent 模拟采用耦合式求解器,计算选用湍流模型 k-epsilon 模型。燃气泄漏主要涉及自然腐蚀或焊缝失效等情况下形成的小孔泄漏,孔径一般小于 20mm^[9]。选取泄漏口位于管道中间,泄漏方向朝上,孔径为 10mm,定义为质量流量入口边界,根据小孔泄漏计算模型可以得出泄漏口质量流量为 0.109kg/s。空气入口边界条件选用速度入口,排风口边界条件选用速度出口(速度设置为负值)。壁面无滑移,标准壁面函数。

2 工况建立与模拟结果分析

管廊截面形式包括断面面积和断面宽高比。本文选取几种比较典型的截面形式进行研究,如表 1 所示。其中截面类型 1、2、3、4 保持截面宽高比不变,改变截面面积;截面类型 2、5、6、7 保持截面面积不变,改变截面宽高比。由于截面形式同时也会影响管廊内的风场,因此本文将研究无通风时和通风时对燃气扩散规律的影响,通风时进、排风口风速分别设置为 0.9m/s、1.8m/s、2.7m/s、3.6m/s、4.5m/s。

表 1 管廊截面尺寸参数

Table 1 Section size of natural gas compartments

截面类型	宽度(m)	高度(m)	面积 (m ²)	宽高比
1	1.5	2.5	3.75	0.6
2	1.8	3	5.4	0.6
3	2.1	3.5	7.35	0.6
4	2.4	4	9.6	0.6
5	2	2.7	5.4	0.74
6	2.4	2.25	5.4	1.07
7	2.7	2	5.4	1.35

2.1 截面形式对燃气浓度分布的影响

选择纵断面(输气管道所在位置)和横断面(z=105m、110m、115m),待燃气泄漏扩散 1min 后,观察无风速条件下不同截面尺寸下燃气浓度分布规律。

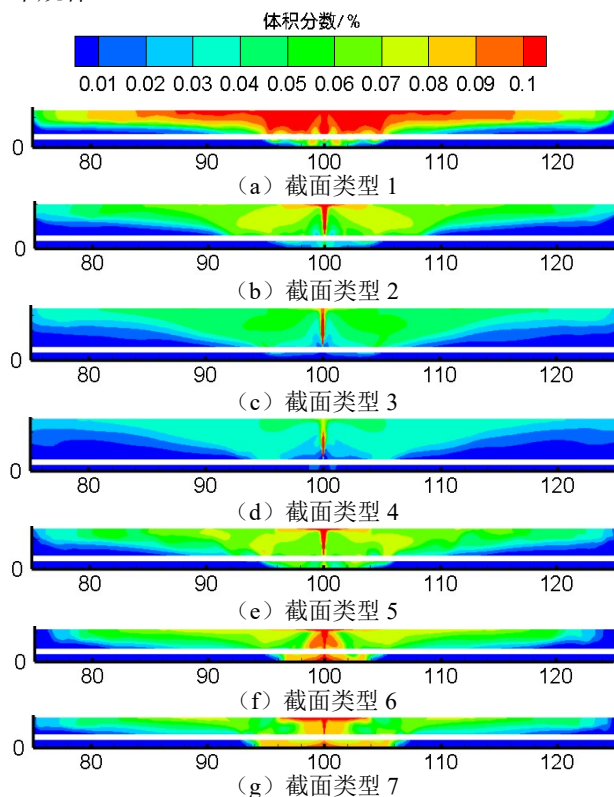


图 2 燃气纵断面浓度分布图

Fig.2 Gas longitudinal section concentration distribution diagram

从图 2 中可以看出,不同截面形式下纵断面气体浓度分布具有相似性。甲烷浓度在泄漏口附近最大,并在舱室两端呈对称分布。甲烷从泄漏口高速射出,在泄漏口附近卷吸空气发生强烈的掺混,并向四周不断扩散,浓度逐渐减小。由于甲烷的密度

小于空气,在扩散过程中受浮力作用甲烷主要积聚在管廊顶部,使得管廊上方甲烷浓度高于下方。

同时对比截面类型 1-4 可以发现,截面面积越大,管廊内空气含量越高,稀释了甲烷的浓度,使得甲烷纵断面整体浓度减小;对比截面类型 2、5-7 可以发现,截面宽高比增大,泄漏口附近的甲烷浓度增加。这是因为甲烷射流会受到顶板约束作用,形成涡流,而管廊高度减小使较高速且浓度更大的燃气碰撞壁面,涡流作用增强,使泄漏口附近浓度更高。

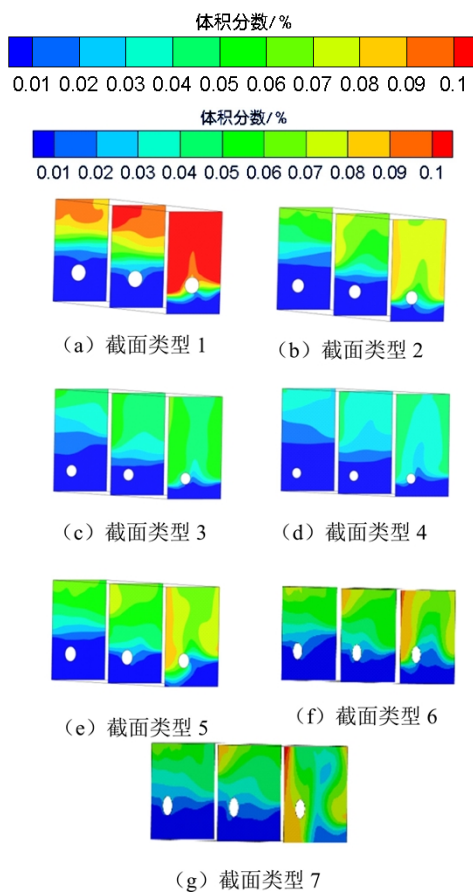


图 3 燃气浓度横向分布图

Fig.3 Gas horizontal section concentration distribution diagram

从图 3 可以看出,不同截面形式下横断面燃气浓度呈明显的分层分布现象,且管廊顶部两侧的燃气浓度要大于中间的燃气浓度。这是由于两边侧壁的阻碍作用,燃气在侧壁处积聚,使得浓度较高。

同时对比截面类型 1-4 可以发现,随着截面面积增大,横截面甲烷浓度减小;对比截面类型 2、5-7 可以发现宽高比越大,管廊右顶部分燃气浓度也就越高,这是因为管廊高度的减少使燃气能达到

的最大浓度增加。

2.2 截面形式对燃气最大扩散长度的影响

可燃气体泄漏后与空气混合会形成容易爆炸的危险区域,天然气爆炸极限体积分数为 5%~15%。在无风速条件下,分析不同截面形式燃气舱内燃气达到爆炸极限下限的最大扩散长度随时间变化的关系。

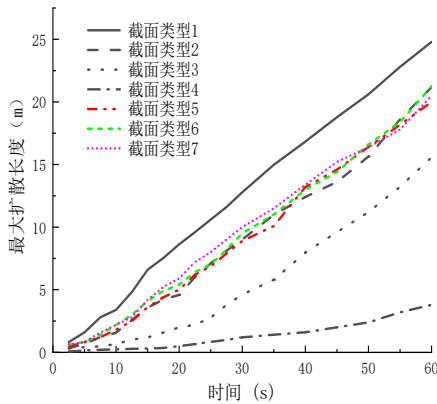


图 4 不同截面面积下燃气最大纵向扩散长度随时间变化图

Fig.4 Relationship between the maximum longitudinal diffusion length of gas and time under different cross section form

从图 4 可以看出,燃气在管舱内的最大扩散长度与时间呈正相关,曲线的斜率可以看作燃气的扩散速度。对比截面类型 1-4 可以发现,当截面面积增加,曲线的斜率逐渐减小,甲烷的扩散速度减小。这是因为截面面积越大,管廊内燃气浓度梯度越小,向两端扩散的动力越小。

同时对比截面类型 2、5-7 可以发现,泄漏前期,宽高比小的截面扩散的较远。这是因为管廊顶部的燃气扩散的最快,而宽高比小的截面在泄漏口附近顶部燃气浓度较高,因此扩散速度略快。随着扩散进行,不同宽高比顶部燃气浓度逐渐接近,因此扩散距离也相差不大。整体来看,不同宽高比燃气扩散速度相差不大。可以认为,截面宽高比对燃气扩散速度影响不大。

2.3 截面形式对管廊燃气平均浓度的影响

分析无通风和通风时不同截面类型的燃气舱在燃气泄漏扩散 1min 后的燃气平均浓度。由于燃气舱 200m 长度内燃气平均浓度过小,因此选取距离泄漏口前后 30m 体积内的燃气平均浓度变化代

替舱室内的燃气平均浓度变化。

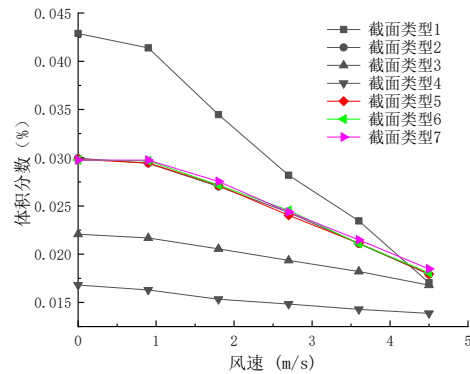


图 5 不同截面面积下燃气平均浓度随风速变化图

Fig.5 Relationship between average concentration and wind speed under different cross section form

由图 5 可以看出,管廊内的燃气浓度变化与风速呈负相关关系。这是因为当管廊进行通风时,会带来外界的新鲜空气,同时也会将燃气排出到外界,稀释管廊中燃气的浓度。风速越大,带来的空气量越多,排出的燃气越多,管廊内燃气浓度越低。

对比截面类型 1-4 可以发现,当增加风速时,不同截面面积下燃气浓度呈现不同程度降低。其中截面面积越小,燃气浓度下降的越快。根据黎庶^[10]的研究,通风时管廊内的风速分为进风段、排风段和中间稳定段。计算进风风速为 4.5m/s 时不同截面尺寸下中间稳定段的断面平均风速如表 2 所示。可以看出,同样的进、排口风速下,截面面积越小,管廊内风速越高,对燃气稀释效果越好。即使截面类型 4 管廊内燃气浓度高,但其风速远高于截面类型 1,因此当进口风速为 4.5m/s,4 号管廊燃气浓度甚至略低于 1 号管廊。

对比截面类型 2、5-7 可以发现,同一风速下,不同宽高比的管廊内燃气平均浓度值相差不大。从表 2 也可以看出,不同宽高比下管廊内通风稳定段断面平均风速值相近。由此说明,同一风速下对不同截面宽高比的管廊通风稀释效果相同。

表 2 通风稳定段风速

Table 2 Wind speed in ventilation stable section

截面类型	1	2	3	4	5	6	7
风速 (m/s)	1.24	0.85	0.62	0.47	0.85	0.84	0.85

2.4 截面形式对爆炸危险区体积的影响

利用 Fluent 后处理软件可计算出特性参数区间内在流体域所占的体积,因此计算燃气泄漏

1min 后不同截面类型的燃气舱在不同风速下形成的爆炸极限浓度范围内的体积如图 6 所示。

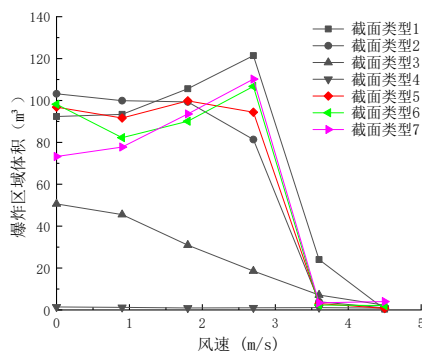


图 6 不同截面面积下爆炸区域体积随风速变化图

Fig.6 Relationship between the volume of explosion area and time under different cross section form

从图中可以看出, 当风速小于 2.7m/s 时, 截面类型 1、2、5-7 管廊内爆炸区域体积变化不大, 甚至出现了随着风速增大爆炸区域也增大的现象。这是因为通风虽然会稀释管廊内污染物浓度, 但当通风的风速过小时, 管廊内的绝大部分污染物浓度仍然处在爆炸极限范围内, 而且通风会加速燃气的扩散导致了爆炸区域体积增加。

对比截面类型 1-4 可以发现, 风速小于 4.5m/s 时, 同一风速和泄漏量下, 截面面积越小, 爆炸危险区域越大。结合燃气舱燃气平均浓度变化可知, 截面面积越小燃气舱内燃气浓度越高。因此在同样的泄漏量下, 管廊截面面积越小, 稀释管廊内燃气浓度所需的通风量越大。

对比 2、5-7 可以发现无风速时, 截面宽高比越大形成的爆炸区域体积越小。结合横截面的浓度分布图可以看出宽高比大的管廊泄漏口附近燃气浓度较高, 部分区域燃气浓度高于爆炸上限, 使得爆炸区域减小。随着通风风速增加, 宽高比大的管廊内那部分高浓度燃气浓度被稀释到爆炸极限范围之内, 因此爆炸危险区域体积增加。同时也可以看出, 虽然截面宽高比不影响管廊内燃气平均浓度, 但由于管廊截面宽高比越大泄露口附近燃气浓度越高, 而不同宽高比的管廊断面风速相差不大, 因此宽高比大的管廊需要更多的通风量来稀释燃气浓度。

3 结论

(1) 同一泄漏量下, 截面面积主要影响管廊

内整体浓度分布, 截面面积增大使管廊内燃气浓度整体减小; 截面宽高比主要影响泄漏口附近甲烷浓度与截面的最大浓度, 宽高比越大泄漏口附近甲烷浓度越大, 且管廊顶部最大浓度增加。

(2) 同一泄漏量下, 截面面积与甲烷扩散速度呈负相关关系, 宽高比对甲烷扩散速度影响不大。

(3) 通风能有效稀释管廊内污染物浓度。同一风速下, 截面面积越大, 管廊内风速越小, 通风稀释效果越差。截面宽高比对管廊内风速大小影响不大。

(4) 当通风量不足以稀释燃气浓度到爆炸下限以下时, 不但不能减小爆炸区域体积, 甚至会加速燃气扩散, 使管廊内更加危险。燃气舱截面面积越小, 宽高比越大, 舱室内危险程度越大, 通风稀释所需的通风量越大。

参考文献:

- [1] 邱灏, 邓志辉, 袁艳平, 等. 通风形式对综合管廊内空气温度影响的研究[J]. 制冷与空调, 2018, 32(6): 668-672.
- [2] 安昱萱. 燃气管道纳入综合管廊后的安全风险防控[J]. 市政技术, 2019, 37(6): 186-189.
- [3] 方自虎, 蔺宏, 黄鹤, 等. 地下综合管廊天然气管道泄漏扩散模拟研究[J]. 工程力学, 2006, 23(9): 189-192.
- [4] 王雪梅, 谭羽非, 张金冬, 等. 事故通风状态管廊燃气管道泄漏扩散模拟研究[J]. 煤气与热力, 2019, 39(9): 22-28.
- [5] 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.
- [6] 袁欣然, 许淑惠, 许荣吉, 等. 综合管廊燃气舱泄漏扩散规律研究[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(6): 802-806.
- [7] Ping Zhang, Huiqing Lan. Effects of ventilation on leakage and diffusion law of gas pipeline in utility tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020.
- [8] 吴欢. 综合管廊燃气舱事故通风方案优化及爆炸危害性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- [9] 霍春勇, 董玉华, 余大涛, 等. 长输管线气体泄漏率的计算方法研究[J]. 石油学报, 2004, (1): 101-105.
- [10] 黎庶. 综合管廊通风阻力特性的实验与仿真研究及其应用分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.