

CFD 数值模拟在地下综合管廊燃气舱通风系统的应用

肖璇

北京城建设计发展集团股份有限公司 100037

DOI:10.12238/ems.v7i7.14270

[摘要] 本文结合实际工程对综合管廊工程中燃气舱通风系统设计进行探讨, 采用 CFD 模拟技术对燃气舱天然气泄漏时的通风效果进行模拟分析计算, 以期验证燃气舱的事故通风系统能否确保燃气管廊的安全运行。从而指导燃气管廊通风系统的设计及安全运行管理。

[关键词] CFD; 综合管廊; 燃气舱室; 事故通风

1. 概述

随着城市建设水平的不断提高, 城市市政综合管廊的建设规模也有越来越大的趋势, 同时管廊内容纳的管线种类也越来越齐全。燃气管道由于其危险性在纳入综合管廊工程时应采取相应的安全技术措施, 以确保系统的安全可靠运行。本文结合实际工程对综合管廊工程中燃气管廊舱室通风系统设计进行探讨, 采用 CFD 模拟技术对地下综合管廊燃气舱天然气泄漏时的通风

效果进行模拟分析计算, 以期对燃气管舱室的安全运行管理及对类似工程设计提供参考。

2. 工程概况

该工程地下一层为交通连廊, 地下二层为支管廊及空间开发, 地下三层为综合管廊。该综合管廊工程为一条弧状环路, 主管廊全长 1500 米, 分为若干个舱室, 其中天然气舱室在管廊的内

环, 断面尺寸为 $2500 \times 2200 \text{mm}$ (宽 $\times$ 高), 主舱室长 1500 米, 支线舱室共计 900 米, 地下综合管廊平面布置如图 1。天然气管道为 $\Phi 400 \times 6 \text{mm}$ 的螺旋焊缝管, 每 6m (在管道弯曲处约 3~5m) 长有一道环向焊缝, 燃气管线设计工作压力为 0.4 MPa。沿天然气舱顶部位置每 8 米设置燃气探测报警器。

3. 天然气舱室

本工程在天然气舱室内敷设有一根 $\Phi 400 \times 6 \text{mm}$ 的天然气管, 设计工作压力为 0.4 MPa, 天然气的主要成分是甲烷 (CH_4), 当其在空气中浓度达到 10% 时, 可使人窒息死亡, 空气中天然气含量达到 5%~15% 时, 遇着火源会发生爆炸^[1]。

燃气管道不应布置在密闭空间内^[2], 天然气管道应在独立舱室内敷设^[3]。由此可见, 人们对于天然气管道入廊仍有安全方面的顾虑。有关学者已通过事故树模型和贝叶斯网络得出城市地下综合管廊火灾爆炸事故的发生概率为

0.0381^[3]。根据其地下综合管廊火灾爆炸事故的发生概率, 虽然发生火灾爆炸概率极低, 但还是有发生火灾爆炸的危险。而诱发燃气管道爆炸事件发生的主要因素不可忽视, 其燃气管道事故泄漏则是诱发爆炸的主要因素之一。而通风系统安全、可靠的运行则是在燃气管道事故泄漏时, 抑制天然气浓度诱发燃气管道爆炸的重要措施之一。

4. 通风系统设计

本项目天然气舱室的送排风系统设平时送、排风机和事故通风送、排风机。平时通风换气量为 3 次/时, 各设置 3 台平时送、排风机, 每台送风量为 $13000 \text{m}^3/\text{h}$, 风压为 850Pa, 事故通风换气量为 15 次/时, 各设置 3 台事故风机, 事故送风机每台的送风量为 $33000 \text{m}^3/\text{h}$, 风压为 850Pa, 为使燃气舱形成一定的负压, 事故排风机每台的排风量为 $37000 \text{m}^3/\text{h}$, 风压为 960 Pa。风机的启停由定时控制器及可燃气体探测器控制相结合控制, 平时通风每相隔 3 小时运行 1 小时, 事故通风由可燃气体探测器根据设定值控制。事故通风时, 事故通风机与平时通风机并联同时运行。送、排风口平面布置示意图见图 2。

5. 数值模拟技术

本工程天然气舱室的模拟计算涉及流动和扩散问题^[5], 采用的是 CFD (Computational Fluid Dynamics) 技术, 即计算流体力学技术^[6]。

任何流体运动的规律都是由以下 3 个定律为基础的: 质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。研究物质扩散规律时还要用到组分守恒定律。这些基本定律可由数学方程组来描述, 即连续方程、欧拉 (Euler) 方程、N-S 方程、Fickian 扩散方程。通过求解这些数学方程离散、求解, 即可得到流场中离散的数值结果^[6]。本工程采用 FLUENT 软件进行数值模拟。

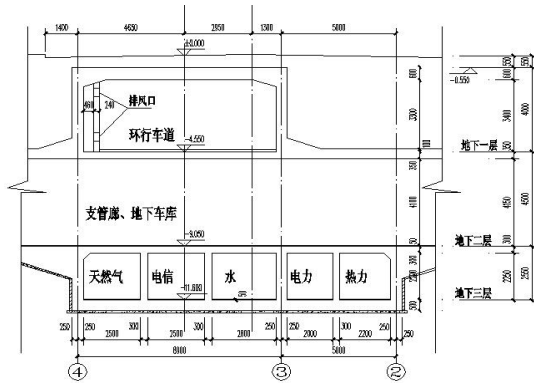


图1 地下综合管廊横断面示意图

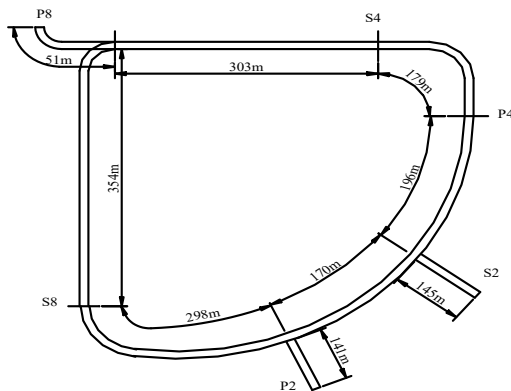


图2 天然气舱室送、排风口平面布置示意图

S2、S4、S8 送风口位置，P2、P4、P8 排风口位置

6. 数学模型

图3所示的方形空腔与圆管之间包围的空间，就是三维数值模拟的计算空间，图中的黑点为可燃气体检测探头的安装位置。

舱室内布置有一定相当数量的防爆照明灯、可燃气体探测器、管道支座，还有少量的燃气分配管路和电线管线。这些结构对燃气扩散和通风气流会产生一定的影响，考虑到其体积尺度相对管廊的空间尺度而言是比较小的，故忽略这些结构对燃气扩散与气流的影响。此外，在管廊一定的局部区域内，温差很小，数值模拟中，不考虑温差驱动的自然对流。

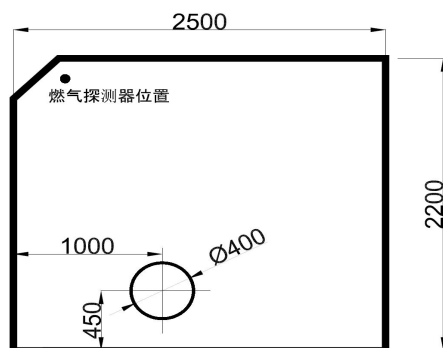


图3 燃气舱室横断面示意图

天然气舱室中的通风或静态可燃气体扩散过程，其流动本质上属于管道流，大多处于湍流状态。本项目采用在工程中得到广泛应用且较成熟的 $k-\varepsilon$ 双方程模型。

以下直接给出连续性方程、动量方程、 $k-\varepsilon$ 方程和组分扩散方程的矢量形式，其推导的细节见相关文献。

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

(2) 动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}} + \rho \vec{g}$$

其中：

ρ 、 $\vec{v}$ 、 $\vec{g}$ 、 p 分别表示流体密度、速度矢量、重力加速度和压力； t 表示时间；应力张量 $\bar{\bar{\tau}}$ 定义如下：

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[\left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \vec{I} \right]$$

上式中的 μ 为有效粘度 μ_{eff} ，由分子扩散黏度和湍流黏度两部分组成； $\vec{I}$ 表示单位张量。

(3) 湍流动能 k 方程

$$\partial / \partial t (\rho k) + \partial / \partial (\rho k v_i)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \\ &= \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \end{aligned}$$

(4) 湍流动能耗散率 ε 方程

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon v_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned}$$

(5) 组分扩散方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i$$

其中下标 i 表示第 i 种组分； Y_i 为第 i 种组分浓度； $\vec{J}_i$ 为扩散通量，定义如下：

$$\vec{J}_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_i} \right) \nabla Y_i$$

上式中的 $D_{i,m}$ 为混合物中第 i 种组分的扩散系数； $Sc_i = \mu_t / (\rho D_{i,m})$ 为斯密特数， D_t 为湍流扩散系数。

边界条件：燃气管道外表面和水泥壁面采用无滑移的固壁边界条件；泄漏口为质量流入边界；计算域出口为

Fluent 软件 Outflow 出口边界条件;送风口为给定速度边界条件;水平计算域入口采用质量流入边界。

7. 数值解法

本项目的数值模拟算法, 采用 SIMPLE 的改进算法 SIMPLEC, 区域离散采用非结构网格, 以达到空间结构的适应。图 4 给出了某一算例的三维数值模拟的横剖面网格划分示意简图, 整个计算域划分的网格总数在 35~70 万之间, 模拟计算过程如图 5 所示。

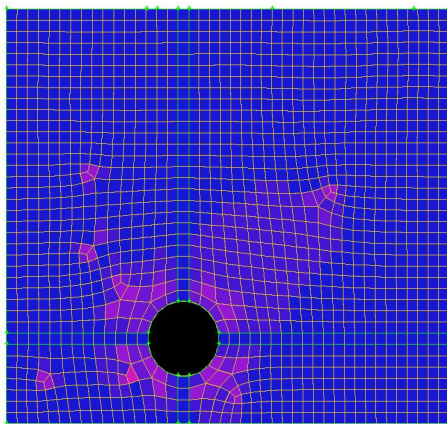


图4 天然气管廊横剖面网格划分

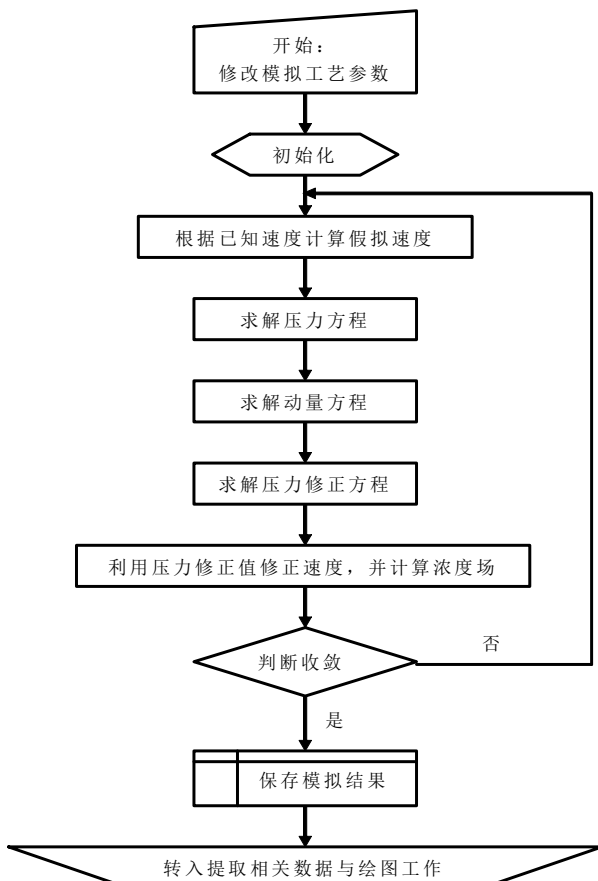


图 5 数值模拟计算流程图

8. 模拟计算分析

1)采用 CFD 模拟针对该地下管廊天然气舱室在不同泄漏工况下,通风系统相应的运行安全问题进行模拟。

泄漏量范围由 0.0148g/s (0.0746Nm³/h) 到 16.3 g/s (82.15Nm³/h), 跨度 1100 倍, 分为微泄漏 (泄漏量小于 0.1g/s 或 0.504 Nm³/h, 相当于 0.5mm 圆孔泄漏, 大约是管道竣工验收时允许泄漏量的 3 倍)、中等泄漏 (泄漏量大于 0.1g/s, 直到 2g/s 或 10.1 Nm³/h, 相当于 2mm 圆孔泄漏) 和大泄漏 (泄漏量大于 2g/s);

泄漏模式包括单点（单孔）泄漏、多点（多孔，如 4 点或 8 点）泄漏、环向焊缝弥漏及 2m 长段弥漏等模式。单孔泄漏的危险性最大，是模拟分析的重点；

通风方式包括不通风（静态自然扩散）、平时通风（通风量 13000 m³/h 或平均风速 0.33m/s）和事故通风（通风量 46000 m³/h 或平均风速 1.16m/s）三种方式。其中不通风情况危险性最大。

2) 不通风时,不同泄漏量、不同泄漏模式下,天然气小室中燃气运动图径和浓度分布有相当大的差别,也有许多共同之处,大体可作如下描述:

在微泄漏 (0.11g/s) 下, 在 3 小时内 0.4% 浓度的混气层会扩展到 150m 远处。燃气报警器会在 0.5 小时内发出第一次报警, 在 2.5 小时内发出第二次报警。但即使不通风, 在 3 小时内混气层的最大浓度不超过 2%, 不致有爆炸危险。

在中等泄漏量以下，天然气出泄漏孔后与周围空气迅速混合形成浓度不大的混气，混气向小室顶部上升形成一个混气层；随时间推移，混气层向远处扩展，同时本身的厚度增加、平均浓度增大；

大泄漏量时,天然气以射流的形式猛烈喷出,卷吸周围空气形成可燃混气流。可燃混气流的核心区域燃气浓度很大。可燃混气流遇到壁面或地面后改变流动方向,同时亦向小室顶部上升形成可燃混气层。可燃混气层迅速向远处推进;

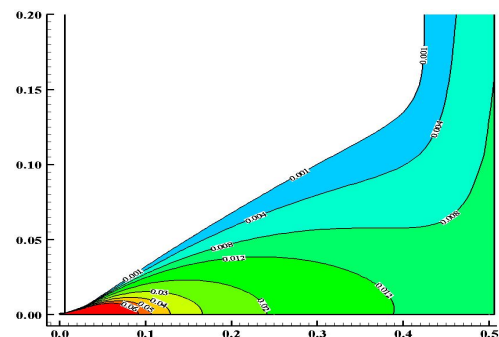
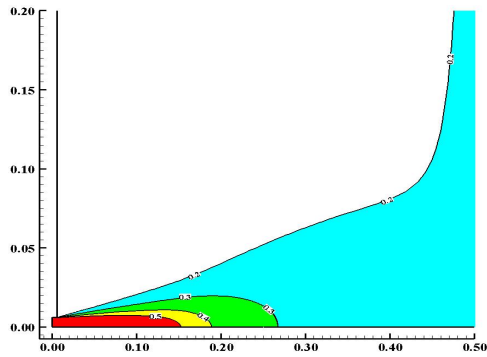


图 6 $\phi 2\text{mm}$ 泄漏孔

图7 $\phi 6\text{mm}$ 泄漏孔

为了更加清楚地描绘小孔泄漏与大孔泄漏的差别,下面给出了2mm与6mm孔口附近天然气与空气混合情况的模拟结果,见图6、7。该图是假定无重力条件下计算的,所以看不出混气上升的倾向,但并不妨碍对天然气与空气混合情况的观察。图6表明天然气出2mm小孔后与空气迅速混合,在距孔口130mm处浓度即降到4%以下;而图7则显示天然气出6mm大孔后与空气的混合情况是很差的,在离孔口0.5m处天然气浓度仍高于20%。

天然气泄漏、混气流动的图景可以用水管泄漏作某种类比。设想将天然气舱室横断面上下旋转180度,并设想天然气管道是一条水管。当管道有小孔漏水时,漏下的水先积存于附近地面,随时间推移,积水厚度增加并向远处流动。当管道有大孔漏水时,水柱直接冲击对面壁面,然后回落到地面形成积水层,积水层迅速增厚并向远处奔流。我们只需将此图像旋转180度就可大体想象天然气管道泄漏时的运动图像。但两者亦有显著不同:第一,天然气会与空气混合形成混气,泄漏孔越小,混合越均匀,混气浓度越低;第二,无论是混气流或混气层,其中的浓度是不均匀的,混气流的核心区浓度最高,小室顶部的混气层则浓度随高度而增加,泄漏孔径越大,浓度的不均匀性也越大。

9. 模拟结果

通过模拟分析对该地下综合管天然气舱室通风系统设计及安全性应注意如下结论:

(1)燃气报警器装于天然气舱室的顶部是合理的。只要有泄漏,舱室顶部的燃气浓度最高,而且越接近顶板浓度越大。报警器装于顶部有利于及早发现险情。需要注意报警器中的探头位置,使它尽可能接近顶板,以便更早更地发现险情。

(2)模拟分析显示在舱室顶部每8米安装报警器,安装距

离是足够的。在微泄漏与中等泄漏情况下,燃气探测报警器都能及时探测到危险信号。

(3)在微泄漏条件下,平时通风制度和通风量能满足安全运行的要求。在设计间隔时间内混气层浓度一般不会达到第一报警限。

(4)在中等泄漏条件下,事故通风制度可以有效地排除险情。报警器有足够时间发出警报。在报警器的延迟时间20秒内,混气浓度一般不会达到爆炸下限;在此事故通风量下,混气层的最高浓度一般低于2%。

(5)应绝对避免大泄漏事故的发生,大泄漏即使是在开启事故通风系统下,亦不能使混气层的浓度控制在爆炸极限浓度以下,所以大泄漏是极度危险的险情。

10. 结语

(1)项目运行后业主委托中国建筑科学研究院空气调节研究所对燃气舱室的通风系统进行运行检测,特别是对事故工况下事故排风系统在微泄漏及中泄漏下能否有效排除风险进行验证,检测结果为燃气管道在微泄漏及中泄漏事故时,事故通风系统能快速有效排除险情,满足设计标准要求、符合模拟结果。

(2)对天然气管廊舱室的通风及安全性问题采用CFD技术进行研究。为类似工程制定相应的技术标准措施奠定了有效可行的基础,也为以后进行类似的工程设计提供了宝贵的经验数据。

[参考文献]

- [1]陈琪文 城市地下综合管廊中燃气管道的安全分析[J] 装备维修技术 2020年34期
- [2]GB50028-2006 (2020版)城镇燃气设计规范[S] 北京:中国建筑工业出版社,2006
- [3]GB 50838-2015. 城市综合管廊工程技术规范[S]. 北京:中国计划出版社,2015
- [4]张勇. 基于BN_bow_tie的智慧城市地下综合管廊运维灾害分析[J]. 建设科技, 2020
- [5]胡桅林 陈泽敬 孟继安《天然气管廊通风及安全性问题研究》[R]课题总结报告
- [6]陶文铨 数值传热学(第二版)[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001. 5.

第一作者简介:肖璇,出生年1991,女,硕士,工程师。