

气体泄漏的单点探测器与红外成像检测的灵敏度模拟分析

谭雨婷, 李家琨, 金伟其, 王霞

(北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 危险气体泄漏引发的事故及灾难对人身安全和社会稳定造成巨大威胁, 及时有效地检测到气体泄露、定位泄漏源以及评估气体扩散趋势等成为研究人员关注的热点。与目前各种单点气体探测器固定位置并通过气体扩散进行泄漏气体探测不同, 基于红外焦平面探测器的红外成像气体泄漏检测技术对可能的泄露点进行成像检测。由于这两种探测器本身的灵敏度差异较大, 且工作原理也有所不同, 所以如何评价两者的探测效率成为人们关心的问题。因此, 基于计算流体力学软件 FLUENT 对两种探测器在室内空间环境的检测灵敏度进行了模拟分析, 比较了两者在实际应用中的优缺点, 指出红外焦平面探测器在响应速度和实际检测灵敏度等方面的独特优势, 对红外成像气体泄漏检测技术的进一步发展具有推动作用和借鉴意义。

关键词: 气体泄漏检测; 红外焦平面探测器; FLUENT 仿真分析; 柱体密度

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2489-07

Model analysis of the sensitivity of single-point sensor and IRFPA detectors used in gas leakage detection

Tan Yuting, Li Jiakun, Jin Weiqi, Wang Xia

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Serious accident caused by hazardous gas leakage is a threat to the safety of people and community. So detecting gas leakage, locating leaking source and evaluating spreading tendency effectively is of great importance to avoid these accidents. Different from the single-point sensor which detects gas leakage relying on the gas diffusion, infrared imaging system is based on Infrared Focal Plane Array (IRFPA) to find the potential leaking source. There are differences in sensitivity and operational principle between these two kinds of detection methods. Thus, according to the simulation result about the actual sensitivities of these two kinds of detectors under common condition based on fluid dynamics software, namely FLUENT, the pros and cons of their applications were summarized. Besides, it was pointed out that IRFPA had advantages on response speed and actual sensitivity, which meant a lot to the application of infrared imaging gas leakage detection.

Key words: gas leakage detection; infrared focal plane detector; FLUENT simulation; column density

收稿日期: 2013-12-22; 修订日期: 2014-01-29

基金项目: 北京市自然科学基金(4121002)

作者简介: 谭雨婷(1991-), 女, 硕士生, 主要从事光电成像技术方面的研究。Email: tanyuting123@hotmail.com

导师简介: 金伟其(1961-), 男, 教授, 博士, 主要从事光电图像处理、夜视与红外技术、光电检测与仪器方面的研究和教学。

Email: jinwq@bit.edu.cn

0 引言

危险气体泄漏对社会稳定和人生安全造成巨大威胁,近年来国内外发生的各类重大事故中,不仅对生命造成极大伤害,在国际上也产生了极坏的影响。因此,发展新型气体泄露检测技术和仪器,及时有效地检测出气体泄露及其位置、流量和类型等,对于避免重大事故的发生具有重要的作用。

目前常用的气体探测器种类繁多^[1-4],单点探测器是其中最大的一类,其固定放置在可能的泄露点附近,通过气体的扩散效应,当泄露气体达到一定的浓度时,探测器发出报警信号,实现泄露气体的探测。这种单点泄露气体探测具有体积小、重量轻、价格便宜等特点,但泄露气体扩散到探测器报警灵敏度所要求的浓度需要一定的时间,甚至可能难以达到报警浓度,因此,往往出现漏报现象。近年来,基于热成像的气体泄露检测技术得到迅速的发展^[5],其直接对可能的气体泄露点进行成像检测,操作简单直观,能够有效探测到气体的泄露位置,成为气体泄露成像检测技术的发展方向之一。

显然,这两类气体泄露探测模式在工作原理上存在较大差异,同时,两类探测器的灵敏度也可能达到 1~2 个数量级的差异,因此,怎样评判其间在实际检测灵敏度和检测效率等方面的差异成为技术发展和现实应用需要回答的首要问题。为此,文中将在两种探测模式分析的基础上,通过 FLUENT 对两种探测器在典型空间环境下的检测灵敏度模拟,分析了两者在实际应用中的特点。

1 基于红外热成像的气体泄露检测原理

红外热成像系统能获取观测目标场景红外辐射的二维分布图像信息。热成像系统对气体泄露源进行探测时,泄露气体云对热成像的影响有两方面:(1) 泄露气体对背景辐射具有强线吸收峰,当该吸收峰处于成像波段时,热成像系统可感受气体云与背景的辐射差,形成具有一定对比度的动态图像细节,气体浓度越高,吸收的辐射强度越大,图像细节对比越明显大;(2) 由于泄露口处气体迅速喷出,与环境气体产生热量交换,可产生一定的温度差,所形成了辐射差异也会热成像系统捉获。文中虽然在模拟

计算时考虑到温度场的变化。但由于气体泄露速度低,产生的热量很小,且喷出后与外界热量交换迅速完成,故在后续判别检测范围时,只考虑了气体浓度对探测的影响,未考虑气体与背景温度差的影响。

由于气体泄露检测往往属于路径积分检测,需要采用柱体密度的概念。假设从泄露点喷出后气体呈圆锥状分布,红外成像探测器置于泄露点一侧,距气体足够远,使得成像探测阵列在观察圆锥状气体团的各个位置时,视线都垂直于纸面方向(见图 1),则该单元探测到的气体柱体密度为图中黑色粗实线上所有点浓度分布的叠加:

$$\sigma = \int_a^b \rho(s) ds \quad (1)$$

式中: σ 为气体柱体密度,单位为 $\text{ppmv} \cdot \text{m}$; $\rho(s)$ 为探测视线上气体 ppm 值分布 ($1 \text{ ppm} = 10^{-6}$); a 和 b 分别为观察视线的起始点和终止点。

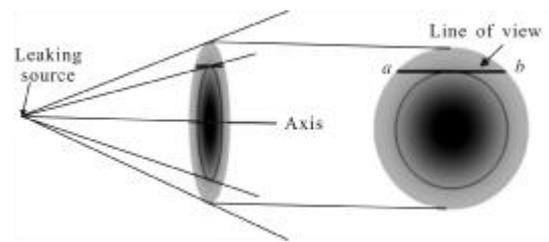


图 1 柱体密度计算原理

Fig.1 Principle of calculating column density

2 典型环境下气体泄露过程的模拟

2.1 气体扩散模拟的数学模型

气体在受限空间内泄露或释放后形成的气云运动规律满足流体力学一般 Navier-Stokes 方程^[6],在湍流流动的描述中将方程组进行雷诺近似,并采用了 $k-\varepsilon$ 方程来封闭方程组。结合气体自身性质即应力应变关系的本构方程,构成了不可压缩黏性流的 CFD(Computational Fluid Dynamics)模型。最终气体释放后数值模拟的 CFD 模型包含^[7]:

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (2)$$

式中: ρ 为混合物的密度; u_j 为 (x, y, z) 3 个方向上的速度。在文中所考虑的问题中,假设流体为不可压,故流场内密度 ρ 为常数,则公式(2)变为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

(2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + (\rho - \rho_a) g_i \quad (4)$$

式中: μ 为流体的动力粘度; g 为重力加速度; P 为绝对压力; ρ_a 为空气的密度。

(3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S_T \quad (5)$$

式中: c_p 为比热容; T 为温度; k 为流体的传热系数; S_T 为流体的内热源以及由于粘性作用流体机械能转换为热能的部分, 有时简称为粘性耗散项。

(4) 组分质量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho c_s)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j c_s) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_s \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial x_j} \right) \quad (6)$$

式中: c_s 为组分 s 的体积浓度; ρc_s 为该组分的质量浓度; D_s 为该组分的扩散系数。

联立这些方程与初始和边界条件可求得流场的分布。但是在大多数情况下, 方程组不存在解析解, 文中使用的模拟分析软件就是采用一定的离散方法对这组方程进行迭代求解, 得到气体扩散到某一指定时刻的浓度分布的离散解, 再采用插值拟合即可得到整个流场的气体浓度分布。

2.2 模拟分析软件

FLUENT 是目前流体分析中广泛采用的通用商业 CFD 软件包, 可模拟和分析复杂几何区域内的流体流动与传热现象。用户可自由选择使用非结构化或者结构化网格来划分复杂的几何区域。FLUENT 基本程序结构图如图 2 所示^[8]。

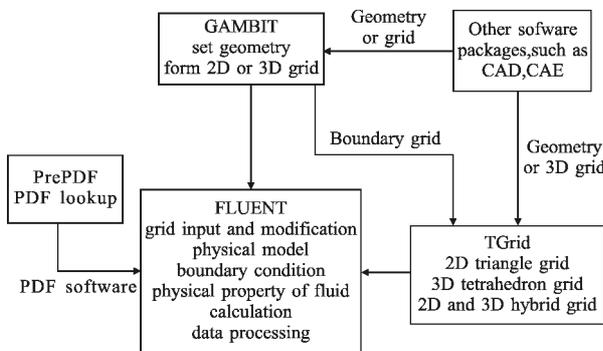


图 2 FLUENT 的基本程序结构图

Fig.2 Basic program structure diagram of FLUENT

文中分析采用了 GAMBIT 和 FLUENT 和 MatLab 3 个软件。通过 GAMBIT 确定计算域及边界条件。在 FLUENT 中导入 GAMBIT 建好的模型后, 检查网格的准确性, 确定边界条件、环境条件以及计算时需要监控的对象(点、线、面、体)的某些特性(文中监控摩尔浓度); 在迭代时, 通过观察残差确定模型建立和网格划分、计算迭代精度控制等的合理性。将 FLUENT 计算结果采用 ASCII 格式导出, 用 Matlab 进行处理, 获得最终需要的数据和气体的浓度及柱体密度分布图。

2.3 典型场景的设计

室内煤气管道及厂房内的储气罐和输气管道常发生泄漏、破裂和燃烧爆炸等事故, 前人也做过与此相关的室内气体扩散浓度变化的研究^[9-11]。文中将在室内环境下进行单点探测器和红外热成像系统检测的模拟比较。如图 3 所示, 假设在通风房间的墙壁处有一乙烯管道发生泄漏, 模拟从开始泄漏后房间内乙烯气体的浓度分布变化, 由此考察在室内布置单点气体检测器和采用热成像系统搜索时, 检测气体泄露所需要的时间。

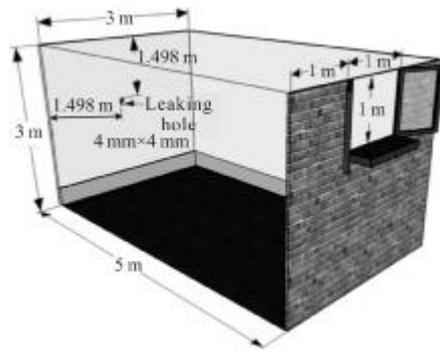


图 3 模拟的室内房间及乙烯泄露场景

Fig.3 Ethylene gas leakage model (a room with a window)

3 不同探测模式的模拟结果及其分析

为了模拟分析两种探测模式的探测效率, 设置了两种计算区域: 对单点探测器模式, 将整个房间设为计算区域; 对热成像探测模式, 将泄漏口附近 $1\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 设为计算区域。

3.1 单点探测器探测模式的模拟

图 3 中, 计算域为整个房间, 泄漏源设为速度入口(给定模拟时流动入口边界的速度和标量), 将 $1\text{ m} \times$

1 m 的窗户设为压力出口,其他各面均为墙壁边界;大气压强为 1.01 kPa, 环境和泄漏源温度为 299.16 K, 重力加速度为 0.8 m/s²; 乙烯泄漏速度分别为 30 m/s、5 m/s、0.5 m/s、0.1 m/s。考虑到乙烯的密度小于空气, 泄漏后会有上升的趋势, 将 4 个单点探测器都设置在房间的顶部, 坐标如图 4 所示。将观察面设为过 P₁、P₂ 和泄漏口中心点的平面。观察该面上乙烯气体浓度随时间的分布。

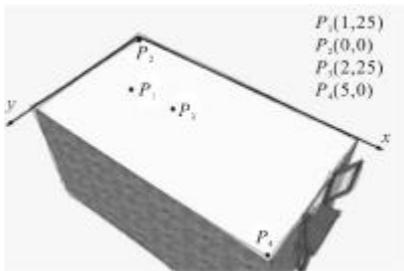


图 4 观察点坐标

Fig.4 Observation point coordinates

乙烯爆炸下限 2.7%, 爆炸上限 36%, 并根据 GB50493-2009^[12], 将可燃气体报警器的报警点设定为: 一级报警限为 25%LEL, 二级报警限为 50% LEL。乙烯的一级报警限为 67.5 ppm。市场上单点乙烯探测器产品的分辨率在 0.01 ppm 到几百 ppm 不等^[13]。这里将探测阈值设为 1 ppm。

从图 5 可以看出: 当泄漏速度为 5 m/s、30 m/s 时, 乙烯气体迅速喷出并在短时间内充满房间。从图 6 泄漏速度 0.5 m/s 的模拟可以看出: 由于喷出速度较低, 气体表现为沿着壁面运动的特性, 且运动速度缓慢, 故可推断离泄漏源较远的探测器需要很长时间才能探测到气体泄漏。

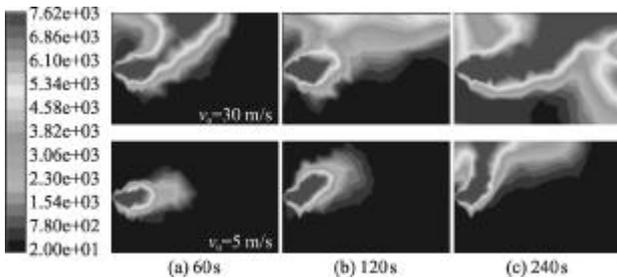


图 5 泄露速度 v₀ 下不同观察时间的气体浓度分布

Fig.5 Concentration distribution of ethylene gas when leakage rate is v₀

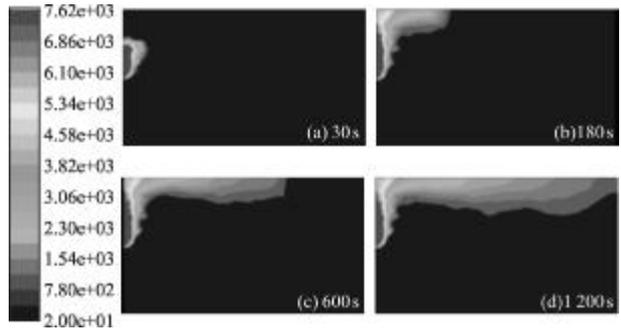


图 6 泄露速度 0.5 m/s 下不同时间的气体浓度 (ppm)

Fig.6 Concentration distribution of ethylene gas when leakage rate is 0.5 m/s(ppm)

图 7 给出泄露速度 0.5 m/s 时各单点探测器达到探测阈值(1 ppm 与横坐标重合的粗实线, 如图 8、9 中所示)所需要的时间。可以看出: 离泄漏源较近的探测器 P₁、P₂、P₃ 分别能在 100 s、190 s 和 300 s 左右探测到乙烯泄漏, 而离泄漏源较远的点 P₄ 在 1000 s 后才能探测到。当泄漏速度为 0.1 m/s 时(见图 8), 探测到乙烯的时间加长, P₁ 和 P₂ 分别在 150 s 和 350 s 时才能探测到; P₄ 点 ppm 值一直小于 1, 在 30 min 内浓度仍变化不明显(即可能漏检)。

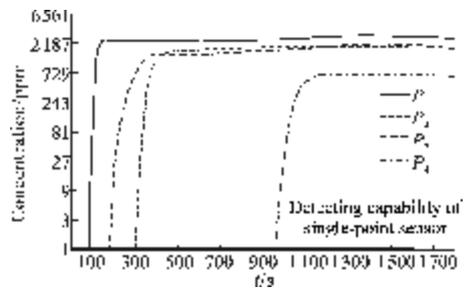


图 7 泄露速度 0.5 m/s 不同考察点气体浓度随时间的变化

Fig.7 Concentration of ethylene gas at different observation points when leakage rate is 0.5 m/s

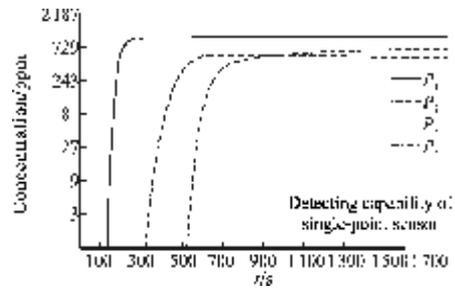


图 8 泄露速度 0.1 m/s 不同考察点气体浓度随时间的变化

Fig.8 Concentration of ethylene gas at different observation points when leakage rate is 0.1 m/s

若将泄漏口缩小为1 mm, 仍保持气体泄漏流量与前面泄漏速度 0.5 m/s 的情形相当, 则泄漏速度为 8 m/s。此时, 泄露气体的分布与探测器检测情况如图 9 所示, 气体不再沿壁面上升, 而是以一定的倾角向上扩散。这表明在泄漏流量一定的情况下, 泄漏速度加大会较大幅度加快各个观测点探测到乙烯的时间; 与之前不同的是, P_3 较 P_2 先探测到, 可能因为 P_1 点处于泄漏口喷出气体初速度的相反方向; 各点浓度值曲线变得更加平缓。

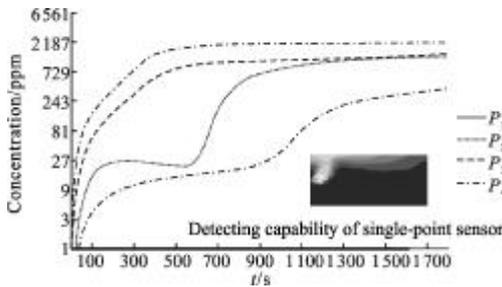


图 9 泄漏速度 8 m/s 各考察点气体浓度随时间的变化

Fig.9 Concentration of ethylene gas at different observation points when leakage rate is 8 m/s

3.2 热成像探测模式的模拟

假设热成像系统的视场能够覆盖气体泄露喷出的气体云, 将背景与气体云的对比度转变为气体云的柱体密度。模拟热成像系统从泄漏源侧面进行探测, 如图 10 所示。

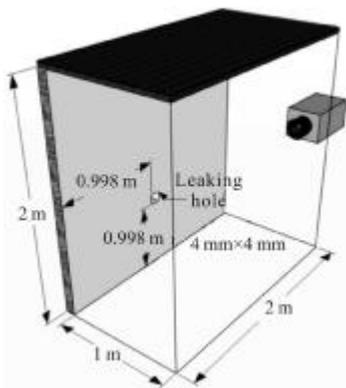


图 10 热成像系统计算域及其尺寸

Fig.10 Interested area of infrared imaging system

依然将泄漏源设为速度入口, 泄漏源所在面和屋顶设为墙壁边界, 其他各面均为压力出口, 其他条件不变。由于在 60 s 时气团的可探测面积在计算域中已占很大比例, 考虑到热成像系统距泄漏源不远,

故在模拟中将考察时间设为 0~60 s。

在热成像探测时要考察路径积分值, 所以先要确保计算域能包括整个乙烯气体团。由于扩散过程中, 气体团体积是不断增加的动态过程, 图 11 给出在 60 s 时热成像系统 3 个积分路径上的气体浓度分布 (路径位置坐标见图中标注)。将各路径上的乙烯浓度按距离积分可得乙烯柱体密度(ppmv·m)。

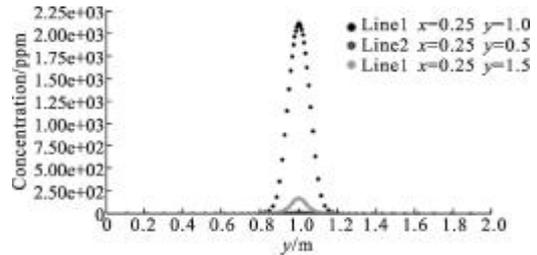


图 11 各路径上的乙烯浓度分布 (60 s)

Fig.11 Concentration distribution of ethylene gas on different routes (60 s)

图 12 给出了泄漏速度 0.5 m/s 时, 热成像系统在几个时刻可观察到的气体分布, 如果将 300 ppmv·m 作为热成像系统阈值^[5], 则图中轮廓线表示的区域就是热成像系统可探测区域。图 13 给出只将泄漏速度变为 0.1 m/s 的模拟结果。

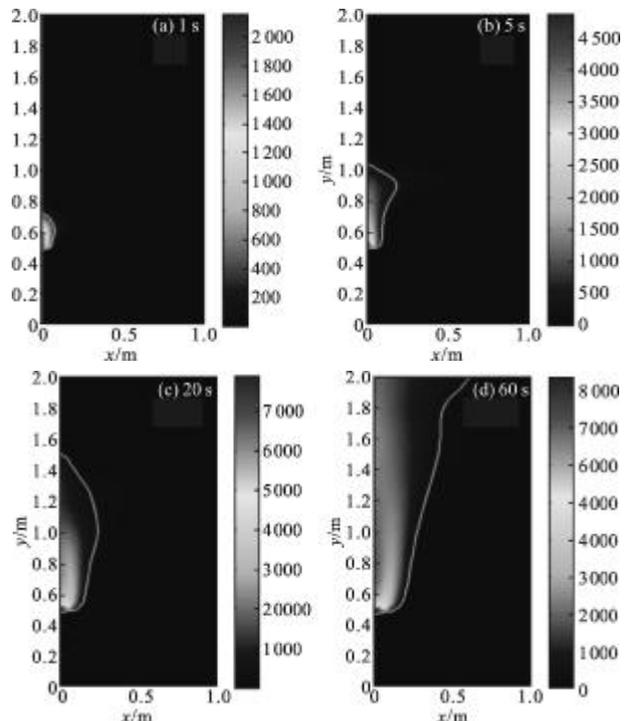


图 12 泄漏速度 0.5 m/s 时不同时刻的乙烯柱体密度分布

Fig.12 Column density distribution of ethylene gas in the interested area when leakage rate is 0.5 m/s

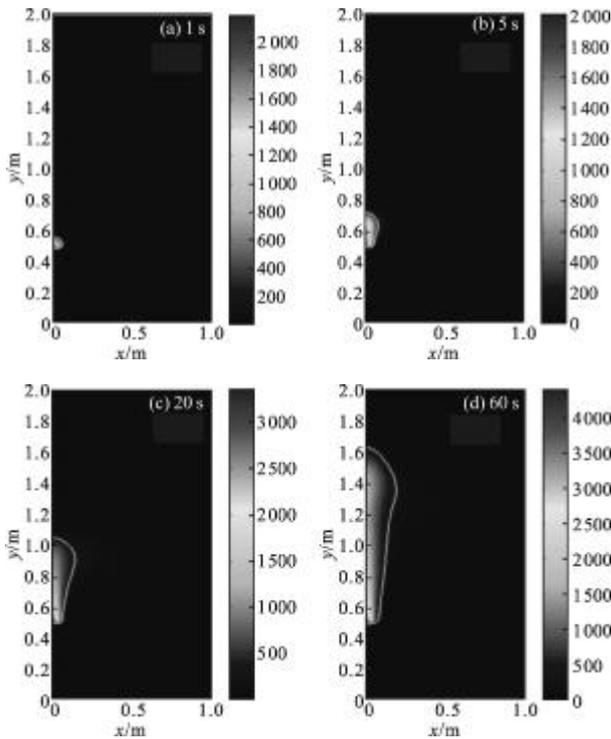


图 13 泄漏速度 0.1m/s 时不同时刻乙烯柱体密度分布图

Fig.13 Column density distribution of ethylene gas in the interested area when leakage rate is 0.1m/s

3.3 分析与讨论

在泄漏量较小的情况下，单点探测器探测到乙烯气体泄漏均需要一定的时间(响应速度)。这一时间与探测器距泄漏源的距离、气体泄漏速度和泄漏量有关。

表 1 中,在文中设定的有限空间内,探测器的位置对探测时间有很大影响:(1) 距离较近的探测器在 100 s 左右可探测到,而距离探测器较远的点(P₄)在 1 000 s 左右甚至更长的时间才能探测到;(2) 受气体扩散方向的影响,也会产生距离近的点反而比距离远的点后探测到气体泄漏(如泄漏速度为 8 m/s 时 P₂ 点)的情况,这说明单点探测器布局位置的设计有优化的必要;(3) 当泄漏量较小时,即使气体分布趋于稳定,距离较远的点也可能探测不到气体,即单点探测器完全失效(如泄漏速度为 0.1 m/s 时的点 P₄);(4) 泄漏速度对单点探测器的探测时间影响较为明显。

因此,如果在对潜在泄漏点无法提前预测,气体泄漏发生的空间更大,与外界气体交换更加频繁的条件下(如厂棚、山坡输气管道等),单点探测器将花费更长的探测时间。

表 1 各单点探测器考察点探测到乙烯泄漏所需时间
Tab.1 Time needed for single-point sensor to detect leakage

Leaking hole	P ₁ /s	P ₂ /s	P ₃ /s	P ₄ /s
Velocity 0.5 m/s, Size 4*4 mm ²	83	316	195	957
Velocity 0.1 m/s, Size 4*4 mm ²	139	527	328	-
Velocity 8 m/s, Size 1*1 mm ²	2	24	5	36

对于文中假设的热成像系统探测模型,在发生泄露的瞬间,泄漏口附近的乙烯柱体密度就足以达到探测阈值,即只要在房间内搜索到,即可实现气体泄漏检测,具有立竿见影的检测效率。如果观察距离加大,则由于大气衰减及成像系统分辨率等的限制,探测时间会略有增加。

对比泄漏速度 0.5 m/s 和 0.1 m/s 的数据,发现 0.5 m/s 的 1 s 和 0.1 m/s 的 5 s 的乙烯柱体密度分布相当。原因可能是由于两者泄漏速度都较小,使得气体刚出泄漏口后 X 方向速度很小,且两个时刻泄漏量相等。同样,前者 5 s 时的数据和后者 20 s 时的数据也相似。即当泄漏速度较小时,热成像系统探测存在乙烯气体的面积与泄漏实际泄漏量成正比的规律。

泄漏速度(泄漏流量)降低对热成像系统探测有一定影响,然而对于单点探测器,某些远离泄漏源的探测点(如 P₄ 点)影响更大。

为了更加直观地比较,将单点探测器与热成像系统置于同一位置 P₅ (1.5, 0.5, 0), 在于泄漏速度 0.5 m/s 的条件下,P₅ 点在 0~1 800 s 内的变化情况如图 14 所示。可以看出,在大约 1 600 s 时单点探测器才能达到 1 ppm 的探测阈值,而此位置的热成像系统则在发生泄漏几秒内就能实现探测。

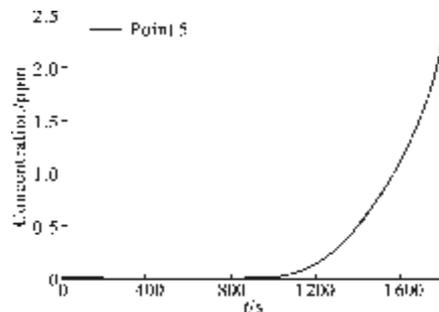


图 14 泄漏速度 0.5 m/s 时 P₅ 点的气体浓度

Fig.14 Concentration of ethylene gas at P₅ when leakage rate is 0.5 m/s

4 结束语

文中基于流体力学软件 FLUENT 在典型的室内环境下,对传统的单点气体探测器和热成像系统两种气体检测模式的检测灵敏度进行了模拟分析,结果表明:单点探测器检测到气体泄漏的响应速度与探测器距泄漏源的距离、气体泄漏速度和泄漏量有较大关联,而热成像系统对不同的泄漏源的响应速度相对稳定。对于考察的模型来说,在泄漏速度较小时,热成像系统的响应速度优于单点探测器。

基于热成像的气体泄漏检测是一种新的成像检测模式,虽然其灵敏度在数值上较传统气体探测器低很多,但由于工作模式不同,热成像气体检测模式在检测速度、直观方便等方面明显具有优势,随着成本的降低,将成为气体泄漏检测的有效工具。

参考文献:

- [1] Li Zhengwen, Qi Hongxing, Xiao Gonghai, et al. Airborne infrared laser radar inspection technique for natural gas pipeline leakage [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2398-2402. (in Chinese)
李正文, 齐洪兴, 肖功海, 等. 机载红外激光雷达监测天然气管道泄漏技术 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(12): 2398-2402.
- [2] Liu Xiu, Wang Lingxue, Jin Weiqi, et al. The development of optical remote measurement for hazardous gas leakage [J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(10): 563-567. (in Chinese)
刘秀, 王岭雪, 金伟其, 等. 危险气体泄漏的光学遥测技术及其进展 [J]. *红外技术*, 2009, 31(10): 563-567.
- [3] Zhuo Bangyuan, Lv Xiandi, Liu Haibo. The comparative study on the performance of infrared methane sensor and catalytic methane sensor [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2010, 17(17): 10-10. (in Chinese)
卓邦远, 吕贤帝, 刘海波. 红外甲烷传感器与催化甲烷传感器性能比较研究 [J]. *科技创新导报*, 2010, 17(17): 10-10.
- [4] Shi Wen. Principle and Application of Hazardous Gas Detection Instrument [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 5-64. (in Chinese)
施文. 有毒有害气体检测仪器原理和应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 5-64.
- [5] Li Jiakun, Wang Lingxue, Wang Meirong, et al. Gas imaging detectivity model combining leakage spot size and range [C]// SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8354: 835415- 835415-12.
- [6] Temam R. Navier-Stokes Equations [M]. Rhode Island: American Mathematical Society, 1984: 1-26.
- [7] Fluent Help Document [EB/OL]. [2011-09-04]. <http://ishare.iask.sina.com.cn/download/explain.php?Fileid=18669589>. (in Chinese)
- [8] Zhu Hongjun, Lin Yuanhua, Xie Longhan. Fluid Analysis and Engineering Simulation Based on FLUENT 12 [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 220-226. (in Chinese)
朱红钧, 林元华, 谢龙汉. FLUENT 12 流体分析及工程仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 220-226.
- [9] Ding Xinwei, Wang Shulan, Xu Guoqing. Study on the dispersion of flammable and toxic gases [J]. *Chemical Engineering*, 2000, 28(1): 33-36. (in Chinese)
丁信伟, 王淑兰, 徐国庆. 可燃及毒性气体扩散研究 [J]. *化学工程*, 2000, 28(1): 33-36.
- [10] Hu Yuanyuan, Wang Zhirong, Jiang Juncheng. Numerical simulation on the change of diffusion concentrations of propane under continuous release indoors [J]. *China Safety Science Journal*, 2010, 20(10): 67-71. (in Chinese)
胡园园, 王志荣, 蒋军成. 室内丙烷连续泄漏扩散浓度变化的数值模拟 [J]. *中国安全科学学报*, 2010, 20(10): 67-71.
- [11] Wang Shuang, Wang Zhirong, Jiang Juncheng. Simulation and analysis of continuous leakage and diffusion of H₂ in plant [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2011, 7(7): 42-46. (in Chinese)
王爽, 王志荣, 蒋军成. 厂房内 H₂ 连续泄漏扩散的模拟分析 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2011, 7(7): 42-46.
- [12] GB50493-2009, Standard for design of combustible gas and toxic gas detection and alarm [S]. Beijing: China Planning Press, 2009. (in Chinese)
GB50493-2009, 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- [13] Shenzhen Peng Lei Technology Co., Ltd.. Ethylene detector [EB/OL]. [2013-06-02]. http://www.18show.cn/zt420556/Product_9638985.html. (in Chinese)
深圳市鹏雷科技有限公司. 乙烯检测仪 [EB/OL]. [2013-06-02]. http://www.18show.cn/zt420556/Product_9638985.html.