

加氢站氢气泄漏事故模拟及后果分析

杨灿剑，付晋

(重庆市沙坪坝区消防支队，重庆400030)

摘要：针对加氢站安全，通过理论模型分析和数值模拟两种方法，对其开展事故模拟和后果分析。利用自行编制的MATLAB高斯扩散程序得到爆炸危险区域的浓度曲线，分析环境风速对氢气扩散的影响，即风速越大，危险区域越向泄漏口收缩；利用CFD软件Fluent建立加氢站氢气泄漏全场景二维模型，模拟结果表明，无风情况下，氢气水平和垂直扩散速度很快，容易富集并形成爆炸气团，而在风速10m/s情况下，泄漏氢气被带动、吹散和稀释，难以富集，爆炸区域仅限于泄漏点附近。环境风不利于氢气稳定扩散，对安全有利。

氢气被认为是一种可持续的、环境友好型的绿色能源，具有来源广泛、燃烧热值高、可循环利用、储存方式多样等特点，被誉为21世纪的能源之星。在氢能的众多前景中，氢燃料电池被认为是最有可能实现产业化的应用之一。而伴随着各国氢燃料电池项目的开展实施，势必快速发展与之配套的加氢站等基础设施。有专家预测，欧洲、美国和日本将在未来的五到六年内实现氢燃料电池、氢能生产和加氢基础设施的商业化。我国燃料电池技术虽刚刚起步，但在政府能源、环保战略的推进下，发展速度不断加快。

国外学者研究表明，从能量利用的角度分析，高压储氢是最为经济合理的选择，而由此也会带来较大的安全问题。高压氢气一旦发生泄漏，很可能引起火灾和爆炸，造成巨大的人员伤亡和财产损失。因此，氢安全是制约氢能发展和推广的主要瓶颈。

加氢站作为高压氢气储存较为集中的区域，其安全性必须受到高度的重视。国际上常用的加氢站风险评价方法主要有快速风险评级和量化风险评价，前者为定性评估，后者虽为定量评估，但在量化指标上存在较大争议。国内浙江大学较早开展相关工作，研究了不同泄漏位置以及环境温度、风速对高压储氢罐泄漏扩散的影响，但场景较为简单，不适用于真实、复杂设施的事故模拟和后果分析。

考虑到氢气泄漏实验的危险性和高昂的费用，笔者选取某加氢站为工程实例，采用理论模型分析和数值模拟(CFD)两种方法对其开展氢气泄漏事故模拟和危险性分析，模拟结果可以为同类场所预防和抑制氢气扩散，减小燃烧爆炸的可能性与破坏性提供工程依据和参考。

1原型描述

某高压氢气加氢站主要设备包括：大容量高压氢气管束车、无油隔膜式氢压机、加气站高压储氢瓶组、高压氢气加注枪、高压氢气专用阀件和泄漏检测报警装置等。而其中，相比管束车、氢压机等流动或临时储氢设施，高压储氢罐储氢时间长、储氢量大、压力高，瓶组的压力表、安全阀一旦失灵或者超过使用压力，极易引起事故，造成燃烧爆炸。

加氢站采用分级充气的传统压注方式，为了使车载储氢瓶内压力达到35MPa，加氢站储氢罐的压力需要高达40~45MPa，才能获得快速加气。

笔者主要考察储氢罐发生泄漏的情况。具体参数见表1。这里不考虑储氢罐内压力变化。

表 1 原型参数

氢气来源	工业副产氢气
氢气纯度	> 99.99 %
泄漏位置	储氢罐顶部
泄漏压力	43 MPa
泄漏孔径	2 mm

2储氢罐泄漏和扩散理论模型

2.1小孔泄漏模型

小孔泄漏模型适用于穿孔泄漏的情形，穿孔泄漏指管道或设备由于腐蚀等原因形成小孔，燃气从小孔泄漏。穿孔直径在20mm以下适用该模型。小孔泄漏持续时间长，泄漏稳定且泄漏点多、不易察觉，潜在危险大。

在储存压力下，氢气以气相形式存在。气体从裂口泄漏的速率与其流动状态有关，即首先判断气体流动属于音速还是亚音速流动。如果为音速流动，则有式(1)：

$$\frac{P_0}{P} \leq \frac{2}{\kappa + 1} \quad (1)$$

式中: P 为容器内介质压力, Pa; P_0 为环境压力, Pa; κ 为气体绝热指数, 氢气取 1.4。

气体泄漏量 Q_0 (kg/s) 计算公式见式(2):

$$Q_0 = C_d A P \frac{M \kappa}{R T} \left[\frac{2}{\kappa + 1} \right]^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}} \quad (2)$$

式中: C_d 为气体泄漏系数, 泄漏口为圆形时取 1, 三角形取 0.95, 长方形取 0.90; A 为泄漏口面积, m^2 ; M 为相对分子质量; R 为气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为气体温度, K; κ 为氢气绝热系数。

如果为亚音速流动, 则有式(3):

$$\frac{P_0}{P} > \frac{2}{\kappa + 1} \quad (3)$$

气体泄漏量 Q_0 (kg/s) 计算公式见式(4):

$$Q_0 = Y C_d A_\rho P \frac{M \kappa}{R T} \left[\frac{2}{\kappa + 1} \right]^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}} \quad (4)$$

式中: A_ρ 为泄漏口面积, m^2 ; ρ 为气体密度, kg/m^3 ; Y 为膨胀因子, 见式(5):

$$Y = \left[\frac{1}{\kappa - 1} \right] \left[\frac{2}{\kappa + 1} \right]^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}} \left[\frac{P}{P_0} \right]^{\frac{2}{\kappa}} \left\{ 1 - \left[\frac{P_0}{P} \right]^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right\} \quad (5)$$

将原型参数代入上述公式得到, 储氢罐顶部泄漏时, 气体属于音速流动, 泄漏强度为 0.0828 kg/s 。

燃气泄漏后会在泄漏源附近形成气团, 气团在大气中的扩散计算通常采用高斯模型。高斯模型基于如下假设: (1) 气体在扩散过程中没有沉降、化合、分解以及地面吸收; (2) 气体泄漏速率不随时间变化, 即为稳定泄漏; (3) 扩散空间的风速、大气均匀稳定; (4) 气云和环境无热交换; (5) 云团内部或云羽横截面上浓度、密度等参数服从正态分布; (6) 地面平整无障碍物。

泄漏气体相对密度小于或接近1的连续泄漏可采用高斯烟羽模型。以泄漏点为原点, 风向方向为x轴的空间坐标系内某一点(x, y, z)处的浓度见式(6):

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q_0}{2\pi V \sigma_x \sigma_y} \times \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \{\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)\} \quad (6)$$

式中: $C(x, y, z, H)$ 为空间某点处浓度, kg/m^3 ; V 为风速, m/s ; σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为下风向、侧风向、垂直风向扩散系数, m ; H 为有效源高。

有效源高等于泄漏源高度与抬升高度 ΔH 之和, 即 $H = H_s + \Delta H$ 。 ΔH 见式(7):

$$\Delta H = 2.4 V_s \frac{d}{V} \quad (7)$$

式中: V_s 为气流出口速度, m/s ; d 为出口直径, m ; V 为环境风速, m/s 。

该经验公式为20世纪80年代Wilson根据管道破裂泄漏实验得到。适合于出口喷射方向竖直向上, 喷射路径上无障碍物的情况。

扩散系数以及大气稳定度等级可查HJ/T2.2-93《环境影响评价技术导则-大气环境》。笔者主要考察4种环境风速条件1、5、8和10 m/s , 其分别对应的大气稳定度等级为A级、C级、D级和D级。

根据上述公式和参数值, 若给出特点浓度值, 要计算其位置, 有无穷多个解(点), 所有的点连起来, 构成一条等浓度曲线, 即高斯曲线。该计算非常繁琐, 计算量巨大, 笔者利用MATLAB开发出高斯扩散模型, 只需改变程序中的参数值, 就可完成数据的分析和计算, 并绘制复杂的二维或者三维曲线, 实现结果的可视化, 大大减少了工作量, 提高了效率, 实用性很强。笔者取3个浓度值绘制等浓度曲线, 分别为氢气爆炸上下限以及氢气在空气中的当量爆炸浓度, 即0.0036、0.02682、0.0666 kg/m^3 (对应的体积分数分别为4%、29.8%和74%)。

高斯模型是三维定常扩散模型, 由于主要考虑泄漏对储氢罐四周建筑的影响, 也为了便于观察分析, 截取有效源高度处(z固定), xy平面为研究对象。

图1所示即为不同环境风速条件下的等浓度曲线(危险区域分布)。

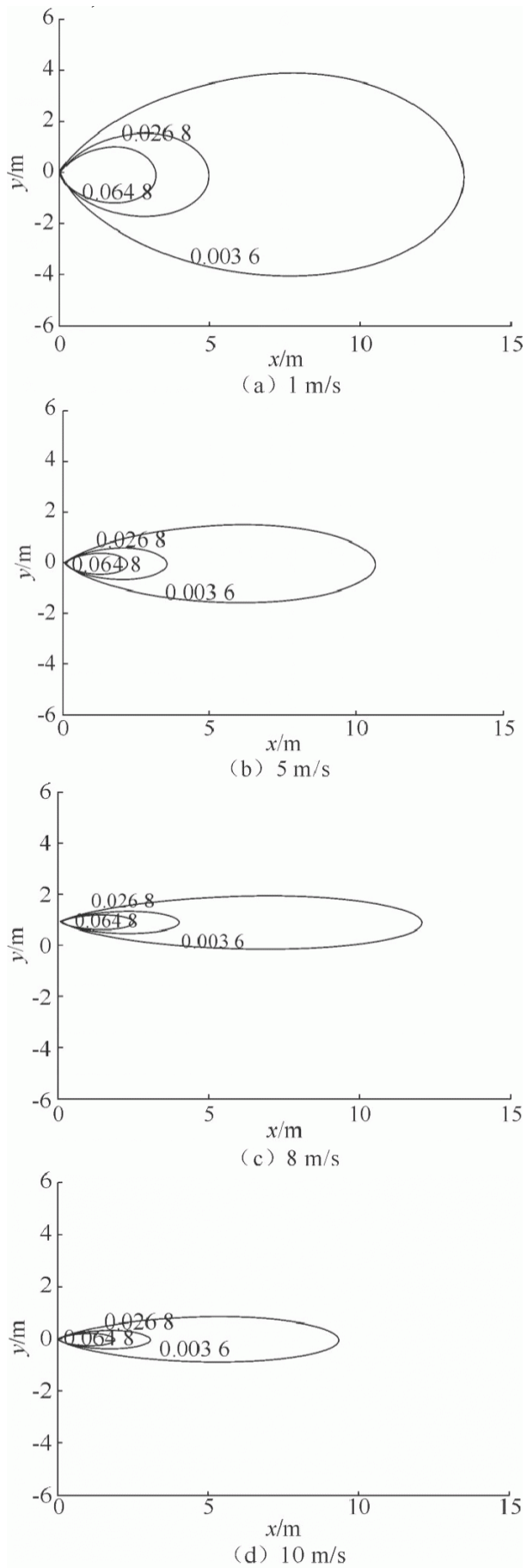


图1 不同环境风速下等浓度曲线

从图1中可以看出，储氢罐顶部泄漏的影响范围(危险区域)随着风速的增加而减小，这主要是由于环境风在带动可燃气体扩散的同时，也起到了一定的稀释作用，爆炸浓度区域向泄漏口收缩。与风向垂直方向(+y和-y方向)的相对收缩速度更快，其主要原因是在+x方向，环境风会吹动可燃气体向前蔓延，而在+y和-y方向，只单纯依靠氢气自身的累积和扩散，浓度下降更为明显。另外，风速愈大，浓度曲线越窄，越接近流线型，形如机翼，这是环境风和泄漏氢气流相互作用的结果，而这种形态也必然是最稳定的；随着风速的进一步增加，如图1(c)和(d)，+y和-y方向的相对收缩速度比+x方向慢。

比较图1(b)和(c)发现，+x方向的危险区域不减反增，这很可能是由不同的大气稳定度等级造成。它们分别对应着C级和D级，相比之下，D级更稳定，对氢气扩散的影响较小，因而+x方向区域更大。

3加氢站氢气泄漏数值模拟

3.1场景描述

由于加氢站所处区域较为空旷，因而笔者主要考虑储氢罐泄漏时，对周围邻近建筑(包括接待中心、加气机、管束车)的影响，即横向扩散，故根据加氢站实际情况(格局、尺寸、间距等)，建立二维模型，如图2所示。其中，为了计算需要，未将各设备顶棚的支柱或者墙壁画出；顶棚采用全封闭处理(考虑最不利的情况)；储氢瓶组、压缩机和管束车采用简化设计；泄漏点如图中箭头所示。

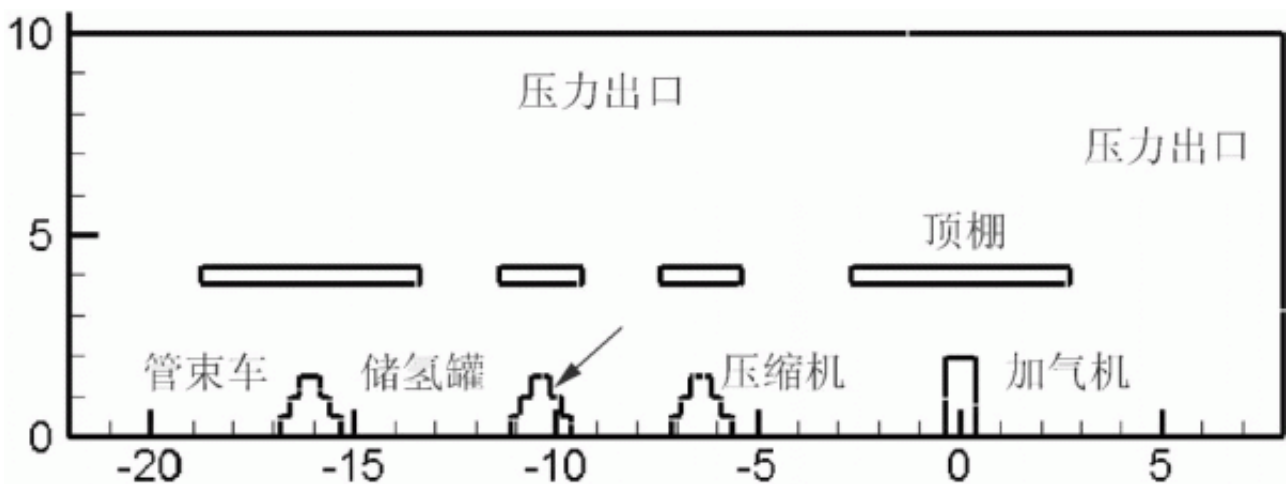


图2 二维数值计算模型图

3.2数值方法

笔者采用Fluent6.3.26二维双精度求解器和组分输运模块对加氢站氢气泄漏进行数值模拟研究。湍流模型采用Realizable模型，该模型在求解平面射流和圆孔射流时精度较高，在求解高压梯度、分离速度等条件下的旋转和边界层问题时也有十分高的精度。以非结构化网格划分全场景，隐式求解非定常过程，时间和空间二阶精度离散。选取适当的欠松弛因子，以保证良好的收敛性和稳定性。

3.3模拟结果讨论与分析

图3为无风条件下，泄漏发生后不同时刻的氢气危险体积分数(4%~74%)区域分布。

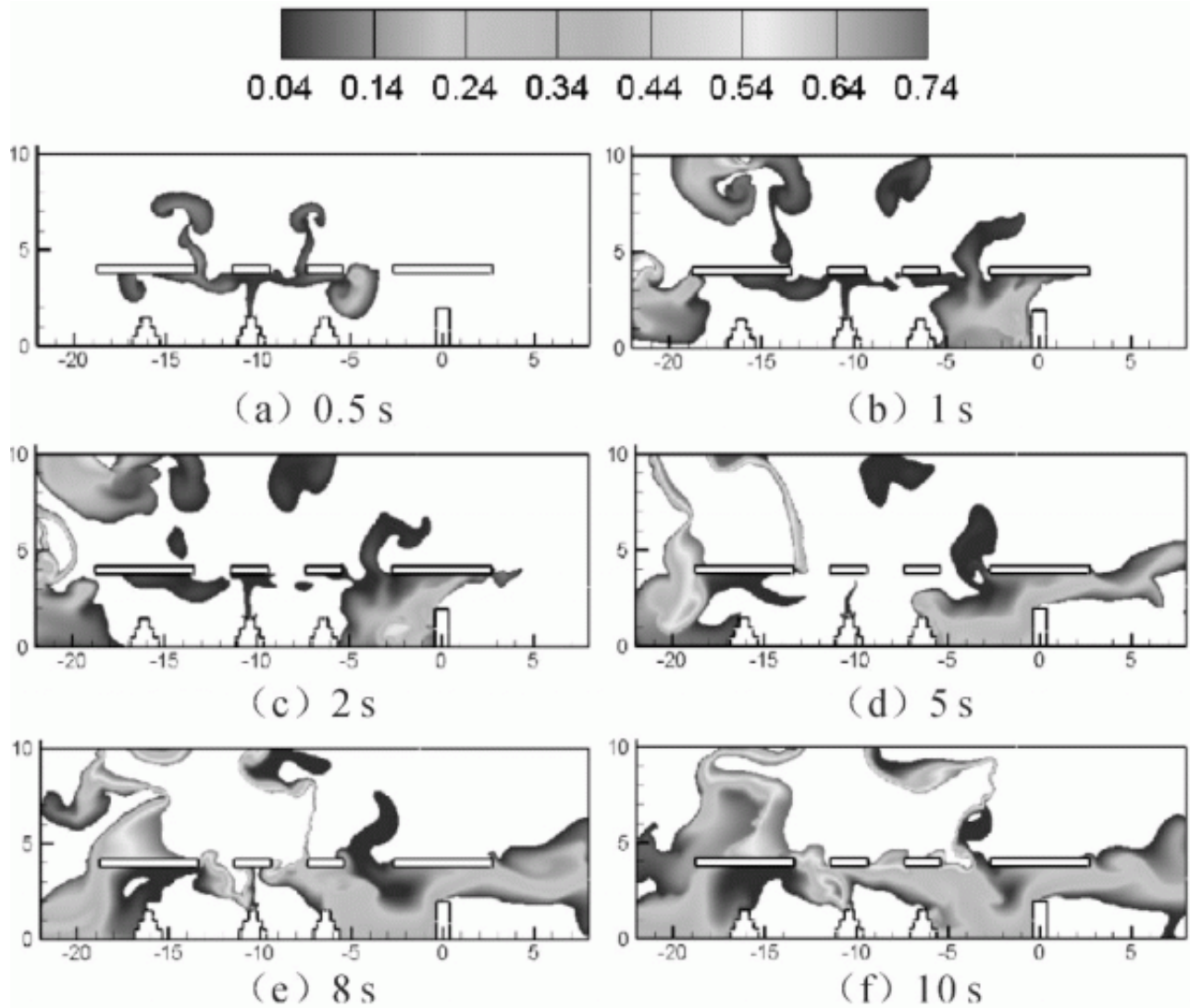


图3 无风情况下加氢站氢气泄漏数值模拟

由图3可以看出，在无风环境下，高压泄漏氢气首先急速向上传播，撞击顶棚后(动量损失)，向四周扩散，由于储罐内氢气不断溢出，使得气流保持着较高的水平扩散速度。在顶棚之间的间隙处，由于自身的浮力以及扩散过程中不稳定性，使得气流在顶棚边缘分叉，一部分损失了大量的水平速度，而在浮力的作用下往上蔓延；另一部分继续作水平运动。继续做水平运动的气流，在与周围大气和壁面的摩擦作用下速度逐渐降低，甚至出现少量的回流。此时，氢气在该处聚积，并在蔓延到地面后，缓慢水平(带涡旋)推进。与此同时，浮力的作用更加明显，氢气开始上升，与之前在分叉处，往上蔓延的部分气体汇合，浓度较高。在画面的右侧，由于加气机的阻挡，很快富集了大量的氢气，有极高的爆炸危险性。

由模拟结果可以看出，即使是2mm的小孔，在43MPa的存储压力下，泄漏扩散速度极快，工作人员根本没有反应的时间。因此，一方面要加强加氢设备的管理、维护和更新，加强氢气报警等；另一方面，工作人员要严格遵守规章制度，禁止违规操作，杜绝明火等致灾因素。另外，在加氢站内可能发生泄漏的区域，如储氢罐、压缩机等，应避免采用封闭顶棚设计，留出敞口，便于泄漏氢气的溢出。

图4为风速为10m/s条件下，泄漏发生后不同时刻的氢气危险体积分数(4%~74%)区域分布。

由图4可以看出，在10m/s环境风速下，高压泄漏氢气向右上方快速扩散，撞击顶棚边缘后被分割成多个气团，这些气团在环境风的带动和稀释下，迅速消失在大气中。储氢罐内不断溢出的氢气，在风力作用下，很难聚积，而同样是被吹散和稀释。爆炸危险区域主要集中在储罐和邻近的压缩机处，氢气浓度较低，易于防范和控制。在加气机处，氢气并没有富集，甚至都没有达到爆炸下限浓度。这一点与无风情况相反。

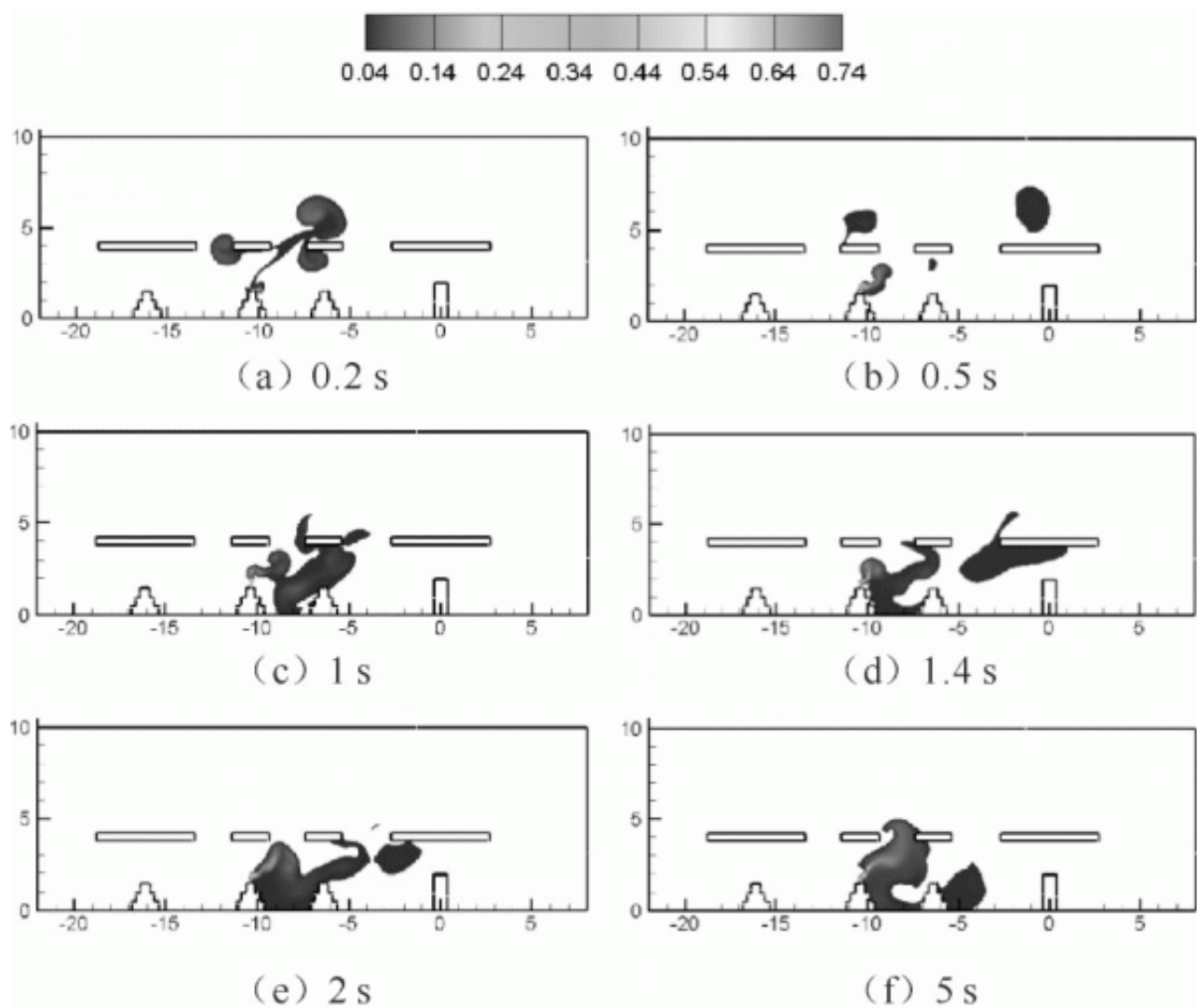
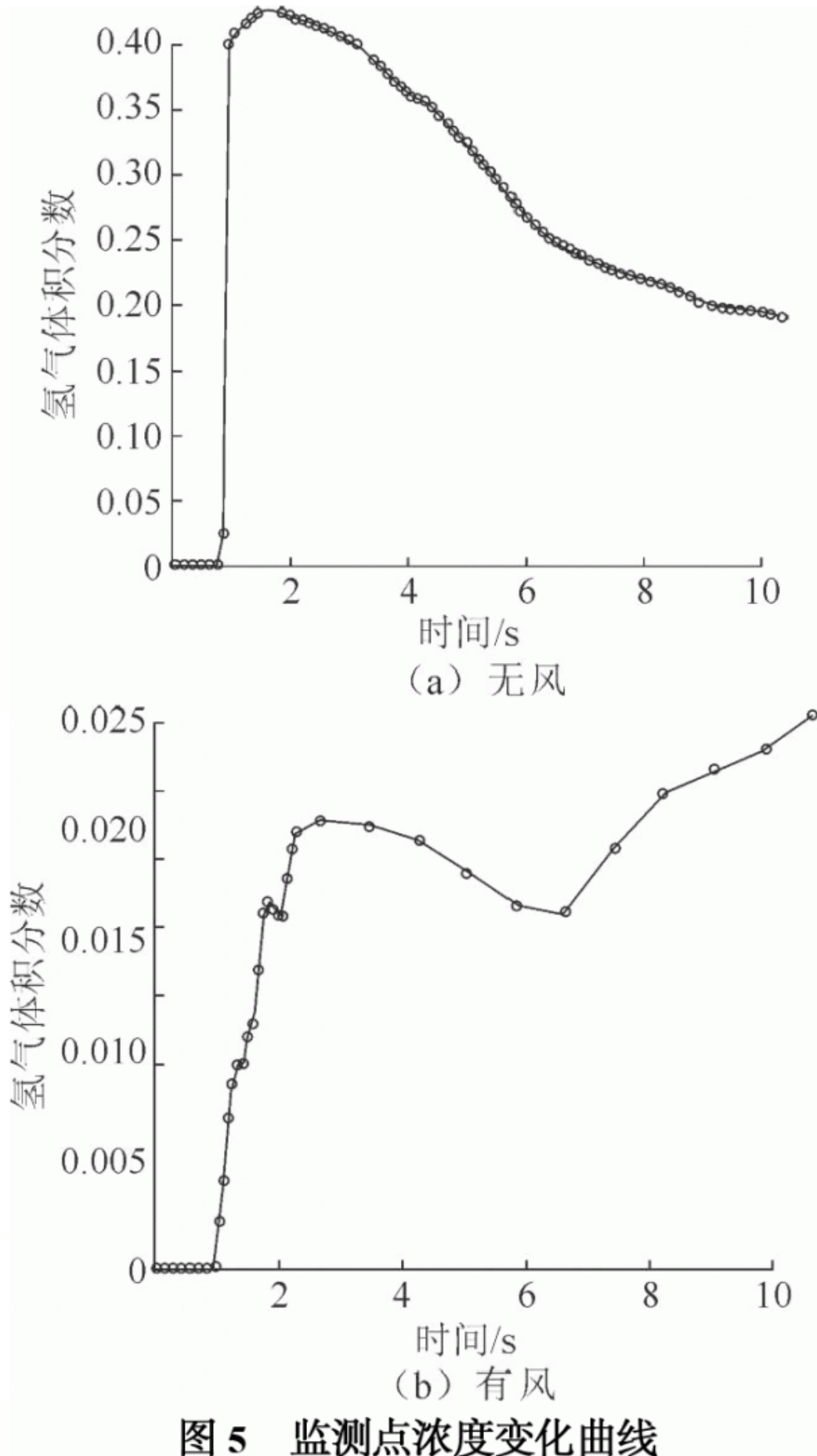


图4 风速 10 m/s 情况下加氢站氢气泄漏数值模拟

图4风速10m/s情况下加氢站氢气泄漏数值模拟笔者在加气机左侧点(图2中坐标(-1, 1.7))处设置监测,得到有风和无风条件下,氢气体积分数的变化。如图5所示。



从图5中可以看出,两种情况下,都在泄漏后1s,氢气体积分数迅速上升,但无风情况时,上升较快,达到最高点0.4后缓慢下降,并逐渐趋于稳定(0.2左右);有风情况时,体积分数上升缓慢,且有较大的波动,始终处于爆炸下限以下,危险性较小。

可见,环境风不利于泄漏氢气的扩散和富集,对安全有利。而这一结论与高斯扩散模型分析一致,即环境风使得爆炸危险区域向泄漏口收缩。

4结论

笔者通过理论分析和数值模拟两种方法对某加氢站开展泄漏事故模拟和后果分析。利用自行编制的MAT2LAB高斯扩散程序得到泄漏时危险区域等浓度曲线。

(1)随着风速的增加,危险区域减小,并向泄漏口收缩;与风向垂直方向,相对收缩速度更快;浓度曲线呈流线型。

(2)若风速进一步增加,与风向垂直方向相对收缩速度比+x方向较慢;

(3)大气稳定度等级对氢气扩散影响较大,大气越稳定,对扩散越有利。

利用CFD软件Fluent建立了加氢站氢气泄漏全场景二维模型,提出数值求解方法,完成了无风和风速10m/s两种工况的计算。

(1)无风情况下,氢气水平和垂直扩散非常迅速;多处形成爆炸浓度氢气团;加气机处氢气富集,不利于人员和财产的安全。

(2)有风情况下,环境风对泄漏氢气有带动、吹散和稀释作用,氢气难以富集;爆炸危险区域主要集中在储氢罐附近;加气机处无氢气富集。

(3)环境风不利于氢气的稳定扩散,对安全有利。笔者的结论可为加氢站设计、选址和事故预防等提供工程依据和参考。

参考文献:

[1]刘春娜.氢能——绿色能源的未来[J].电源技术,2010,134(6):535-538.

[2]钱伯章.燃料电池发展前景及其应用(上)[J].节能与环保,2007,(2):23-25.

[3]Arindam S,Rangan B.Net energy analysis of hydrogen storage options[J].International Journal of Hydrogen Energy,2005,30(8):867-877.

[4]李志勇,潘相敏,谢佳,等.加氢站风险评价研究现状与进展[J].科技导报,2009,27(16):93-98.

[5]刘延雷,徐平,郑津洋,等.管道输运高压氢气与天然气的泄漏扩散数值模拟[J].太阳能学报,2008,29(10):1252-1255.

[6]徐平,刘鹏飞,刘延雷,等.高压储氢罐不同位置泄漏扩散的数值模拟研究[J].高校化学工程学报,2008,22(6):921-926.

[7]刘延雷,郑津洋,徐平,等.环境温度对高压储氢泄漏扩散影响的数值模拟[J].工程热物理学报,2008,29(5):770-772.

[8]郑津洋,刘延雷,徐平,等.障碍物对高压储氢罐泄漏扩散影响的数值模拟[J].浙江大学学报,2008,42(12):2177-2180.

[9]蔡夏英.燃料电池汽车加氢站示范工程建设技术方案研究[J].上海建设科技,2005,(2):6-7.

[10]彭世尼，周廷鹤.燃气泄漏与扩散模型的探讨[J].煤气与热力，2008，28(11)：39-42.

[11]程勇，于林，姚安林.采用高斯模型分析输气管道泄漏后气体的扩散[J].内蒙古石油化工，2010，14：49-51.

[12]邓金华，沈贤明，张保平，等.MATLAB在化学危险性气体扩散模拟分析中的应用[J].中国安全生产科学技术，2005，5(1)：94-96.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/157106.html>