

文章编号: 1673 - 193X (2011) - 08 - 0029 - 05

室内氢气泄漏扩散的数值模拟

卢明, 徐晔, 肖学章

(1. 解放军理工大学工程兵工程学院, 南京 210007)

(2. 浙江大学储氢实验室, 杭州 310027)

摘要: 氢能是有发展前景的新型能源之一, 氢气的安全储存是氢能应用必须解决的问题。本文建立了基于大容量金属储氢装置的室内氢气泄漏扩散模型, 利用计算流体力学软件 FLUENT, 对室内储氢罐的泄漏扩散过程进行数值模拟, 得到了氢气泄漏扩散的速度分布、浓度分布。分析数值模拟结果, 得出在该模拟条件下, 氢气泄漏时的流动状态为射流湍流; 泄漏后上浮扩散, 空间密闭时积累于室顶; 通风条件下大部分区域的氢气浓度仍然高于安全限值。通过数值模拟, 总结出氢气在室内环境下的泄漏扩散规律, 可为氢气泄漏事故的处理消防安全设置提供依据。

关键词: 室内环境; 大容量金属储氢装置; 氢气泄漏扩散; 数值模拟

中图分类号: X937

文献标识码: A

Numerical simulation on the leakage and diffusion of hydrogen in indoor environment

LU Ming, XU Ye, XIAO Xue-zhang

(1. Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

(2. Laboratory of Hydrogen Storage, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Hydrogen energy is one of new types of energy with tremendous potentials, the safety of hydrogen storage is a problem which must be solved in the process of hydrogen energy's application. This paper built a leakage and diffusion model of high capacity metal hydride hydrogen storage tanks in indoor environment. By numerical simulations about leaking and diffusing process of hydrogen storage tanks based on computed fluid dynamic software FLUENT, hydrogen's velocity and mass fraction distributings were obtained. The results of numerical simulation to get conclusions that hydrogen's flowing status was injecting and turbulent when leaking; which floated upward and diffused, accumulated on top layer of room in airtight situation. The concentration exceeded safety limit in most of the space in ventilative situation. Hydrogen's leakage and diffusion rules of indoor environment were summarized by numerical simulation, which can provide reference for dealing with the hydrogen leakage accident and fire protection establishments.

Key words: indoor environment; high capacity metal hydride hydrogen storage tank; Leakage and diffusion of hydrogen; numerical simulation

1 引言

氢能作为 21 世纪的绿色能源, 得到世界各国的普遍关注。储氢是氢能开发利用的基础环节, 如

收稿日期: 2011 - 03 - 10

何高效安全地储存足量的氢气，是氢能大规模商业应用面临的挑战之一。氢气性质活泼，易燃易爆，存储在室内的氢气一旦发生泄漏，如果不能及时排出，会引发爆炸，造成严重后果。氢气扩散速度快，室内的氢气泄漏扩散实验危险性大，并且受到经费场地、安全措施的限制，难以实行。本文采用数值模拟方法研究氢气在室内环境下的泄漏扩散规律，可为涉氢场所的消防安全设置与应急预案的制定提供理论依据。

2 室内泄漏扩散模型的建立

2.1 几何模型的确定

储氢室如图 1 所示，室内的储氢罐为浙江大学储氢实验室研制的大容量金属储氢装置。罐内氢气以金属氢化物的形式储存，当加热到 50℃ 时，供氢压力为 0.6MPa。与传统的高压气瓶、液氢罐等氢气储存方式比较，金属氢化物储氢具有高度安全可靠、体积小、操作简便的突出优点。适用于固定储氢，小规模用氢的场所。

以图 1 储氢室为参照，建立室内氢气泄漏扩散的几何模型如图 2。储氢室为长方体穹顶结构，底部为四个储氢罐并列排放，顶部为通风管。储氢室长 700cm，顶半径 150cm，室高为 550cm，室宽为 400cm，储氢室体积为 150。储氢罐外形为圆柱体结构，直径为 60cm，体积为 0.6。通风管位于穹顶上，长 700cm，有 9 个分孔，直径均为 5cm。

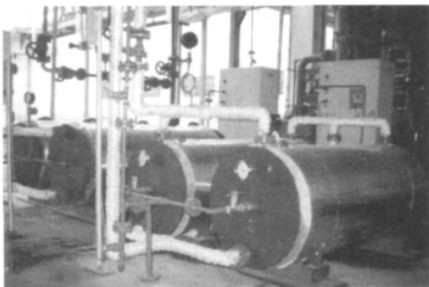


图 1 储氢室

2.2 数值模拟计算方法

数值模拟采用 FLUENT 软件的物质传输与反应模块，基于 Realizable $k-\varepsilon$ 模型。Realizable $k-\varepsilon$ 模型是在标准 $k-\varepsilon$ 模型的基础上进行改进，引入了与旋转和曲率有关的内容，可应用于模拟气体的

湍流流动。

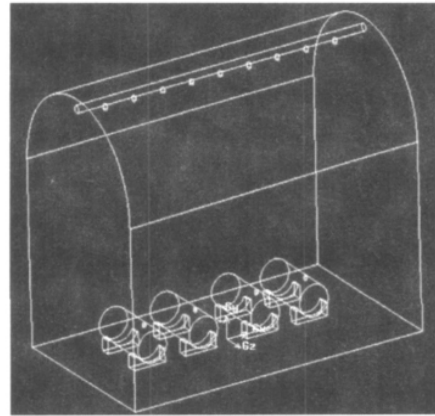


图 2 储氢室几何模型

在 Realizable $k-\varepsilon$ 模型中，关于湍动能 k 和耗散率 ε 的输运方程如下：

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \tag{1}$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E_{ij} \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} \tag{2}$$

式中， G_k 是平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项， $\sigma_k = 1.0$ ， $\sigma_\varepsilon = 1.2$ ， $C_2 = 1.9$ ，各项按下式计算：

$$C_1 = \max \left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right) \tag{3}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{4}$$

$$F_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{5}$$

3 仿真计算与结果分析

在几何模型的基础上生成网格，进行室内环境下的氢气泄漏扩散仿真。模拟计算的参数设置如下：重力加速度取 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ；环境压力为标准大气压，即 101KPa；环境温度为 300K；储氢罐的罐顶出气口为泄漏口，直径为 4cm；罐内氢气温度为 323K，压力 0.6Mpa。取观测视图如图 3 所示，观测平面下方贯穿四个泄漏口，上方贯穿通风

管的九个分孔; 以质量分数来分析氢气在混合气体中的浓度。

数值模拟得到室内环境下氢气泄漏后的速度分布, 浓度的分布与变化。通过结果分析, 总结出室内氢气泄漏扩散的规律。

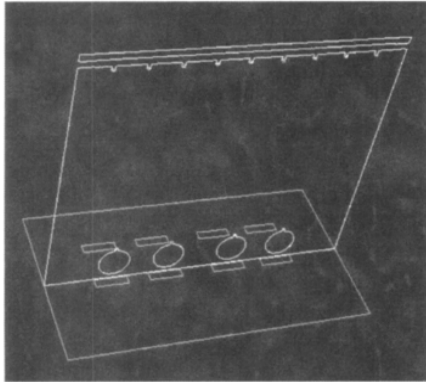


图3 观测视图

3.1 速度分布

氢气自出气口泄漏后, 在储氢室空间的速度分布如图4。氢气从泄漏口竖直向上喷出, 在泄漏口流动速度最大, 约4m/s。喷出后与室内空气进行动量交换, 速度迅速减小。分析图5中的泄漏口速度矢量可知, 越靠近泄漏口中心处的氢气, 速度越大; 越靠近泄漏口边缘的氢气, 受周围空气扰动的影响, 流动速度越小。

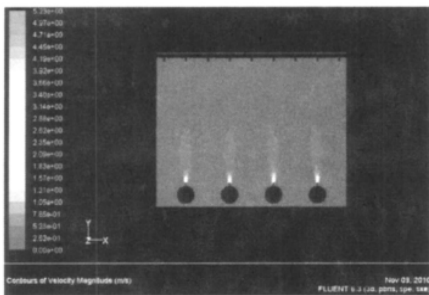


图4 速度分布图

从速度分布与矢量图可知, 由于储氢罐内外压差浓度差大, 泄漏口几何尺寸远小于储氢室空间尺寸, 氢气通过泄漏口流动到室内空气中, 与空气相互混合, 呈现出湍流射流的流动状态。

3.2 密闭条件下的浓度分布与变化

在通风故障的情况下, 室内为一密闭空间, 氢气从储氢罐泄漏后, 不能排出, 将在室内逐渐积累

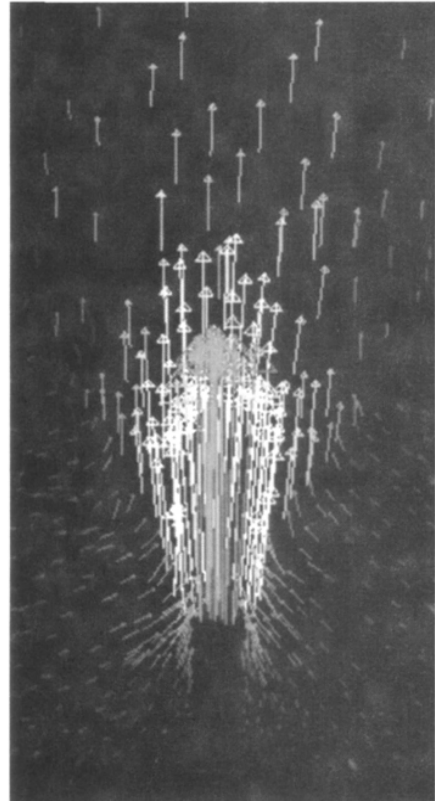


图5 泄漏口速度矢量图

起来。在泄漏的不同时刻, 室内氢气浓度的分布与变化如图6-9所示。

由泄漏后不同时刻氢气浓度的分布与变化可知, 密闭条件下室内氢气的流动与积累有以下特点:

(1) 上浮扩散。由于氢气在标准状态下密度为 $89.88\text{g}/\text{Nm}^3$, 只有空气的 $1/14$, 是最轻的气体。因此当氢气以射流的形式从罐中泄漏出来后, 在空间中表现为浮力上升运动。又因为存在浓度差, 氢气会从浓度大的地方流向浓度小的地方, 表现为空间中的扩散。

(2) 室顶积累。随着泄漏的继续进行, 氢气上浮到室顶后不能排出, 逐渐积累起来。泄漏时间越长, 室顶氢气浓度越大, 积累效应越明显。由图6、7可以看到, 除了泄漏口外, 氢气的高浓度区域集中在室顶。

(3) 浓度分层。如图7、8、9所示, 氢气在室顶不断积累, 同时整个储氢室的氢气浓度也在增大, 并出现了浓度分层现象。在整个的室内氢气空

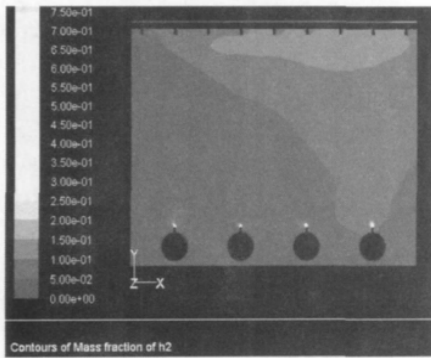


图 6 泄漏 5min 时浓度分布

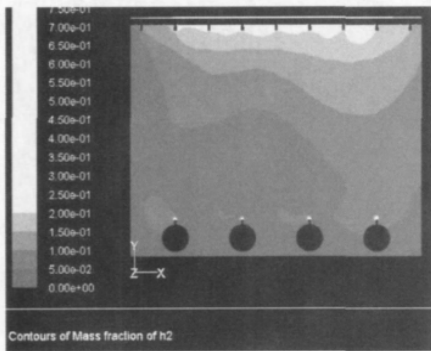


图 7 泄漏 10min 时浓度分布

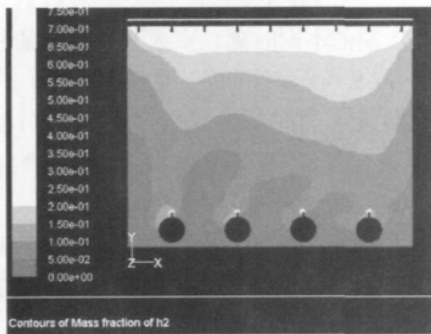


图 8 泄漏 20min 时浓度分布

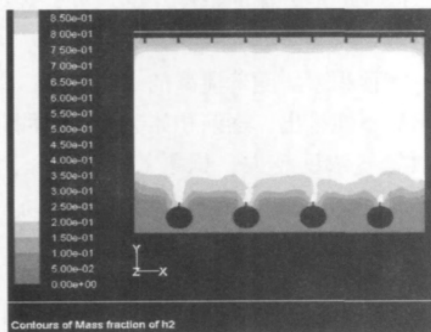


图 9 泄漏 40min 时浓度分布

气混合气团中，室顶的氢气浓度最大，越往下浓度越低。

3.3 通风条件下的浓度分布

在通风良好时，由于排风管安装在室顶，氢气上浮到室顶后，将会迅速排出，不可能在顶部积累。排风能力满足安全要求的情况下，氢气的泄漏进入与通风管排出会很快到达一个平衡，室内的氢气浓度分布呈稳定状态。

通风条件下氢气浓度分布如图 10 所示，氢气的高浓度区域为泄漏口上方被射流波及的空间。氢气上浮到室顶后经排风口排出，没有积累现象。室内空间氢气浓度场的形成受到泄漏射流和室顶排风的共同影响。

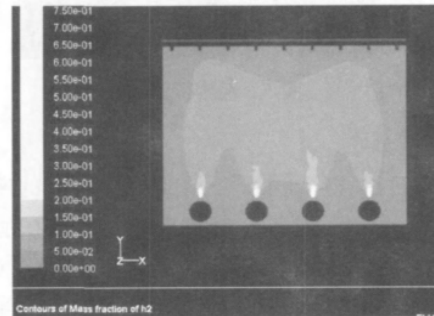


图 10 通风条件下氢气浓度分布

由模拟结果可知，相对于密闭空间，通风条件下氢气浓度明显降低；由于泄漏还在进行，氢气的扩散使室内大部分区域的氢气浓度超过了安全限值。因此，泄漏发生后首先要中断储氢罐的供气，切断泄漏源，辅之以通风将残留的氢气排除。

4 结论

依据 FLUENT 软件中的 Realizable $k - \epsilon$ 湍流计算方程，建立了基于大容量金属储氢装置的室内氢气泄漏扩散模型，通过对室内氢气的泄漏扩散进行数值模拟，得到以下结论：

- (1) 储氢罐内外压力差浓度差作用下，氢气泄漏时呈现射流湍流的流动状态。
- (2) 氢气在密闭的室内空间泄漏后，上浮扩散，积累于室顶，其浓度成层分布，越往高处浓度越大。
- (3) 通风条件下室内氢气浓度的分布受到泄漏和排风的共同影响，大部分区域的氢气浓度仍然高

于安全限值。

以上结论可为室内氢气安全设施的安装与应急预案的制定提供参考。

参考文献

- [1] Sumita Satyapal. The U. S. Department of Energy's National Hydrogen Storage Project: Progress towards meeting hydrogen-powered vehicle requirements[J]. Catalysis Today, 2007: 246-256
- [2] Hidenori Matsui. Characteristics of hydrogen explosions [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2005, 12: 3-9
- [3] R. W. Schefer, W. G. Houl, C. San marchi, W. P. Chemicoff, L. Englom. Characterization of leaks from compressed hydrogen dispensing systems and related components [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006: 1247-1260
- [4] 刘延雷, 郑津洋, 徐平, 等. 环境温度对高压储氢罐泄漏扩散影响的数值模拟 [J]. 工程热物理学报, 29(5): 770-772
LIU Yan-lei, ZHENG Jin-yang, XU Ping, et al. Numerical simulation on the influence of environment temperature on the leakage and diffusion of high pressured hydrogen due to storage tank failure [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 29(5): 770-772
- [5] 任建伟, 廖世军, 刘军民. 规幅储氢技术及其研究进展 [J]. 现代化工, 2006(3): 15-18
REN Jian-wei, LIAO Shi-jun, LIU Jun-min. Progress in lardge-scale hydrogen storage technology [J]. Modern Chemical Industry, 2006(3): 15-18
- [6] 陈长聘, 王新华, 陈立新, 等. 金属氢化物用于燃料电池氢源系统-氢燃料箱, 氢贮输和加氢站 [J]. 工厂动力, 2003(4): 29-36
CHEN Chang-pin, WANG Xin-gua, CHEN Li-xin, et al. Metal hydride's application on fuel cell's hydrogen source-hydrogen fuel box, hydrogen storage and hydrogen fuel station [J]. Factory Power, 2003(4): 29-36
- [7] 陶占良, 彭博, 梁静, 等. 高密度储氢材料研究进展 [J]. 中国材料进展, 28(7): 26-40
TAO Zhan-Liang, PENG Bo, LIANG Jin, et al. Progress in research of high density hydrogen storage materials [J]. Materials China, 28(7): 26-40
- [8] 蒋利军, 屠海令, 黄倬, 等. 燃料电池用金属氢化物贮氢罐的研究 [J]. 稀有金属, 26(6): 517-520
JIANG Li-Jun, TU Hai-Lin, HUANG Zhuo, et al. Metal hydride hydrogen storage tanks for fuel cell [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 26(6): 517-520
- [9] T. H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir. A new eddy viscosity models for high Reynolds number turbulent flows [J] Comput Fluids. 24(1995) 227-238
- [10] 王福军. 计算流体动力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006

中国安科院与新兴重工集团有限公司签订合作框架协议

2011年7月26日,中国安全生产科学研究院与新兴重工集团有限公司正式签订《科学合作框架协议》。签约仪式在北京财富中心新兴重工集团有限公司总部举行。北京市科委重大专项办公室的徐峥主任、丰台区经济与信息化委员会吴神赋主任和民政部紧急救援促进中心原副理事长张群生、中援应急投资有限公司董事长常枋等有关领导,新兴际华集团有限公司刘明忠董事长、姜国均书记,新兴重工集团有限公司宁春林总经理、赵柱副书记等领导,中国安全生产科学研究院吴宗之院长、陈江副书记、张兴凯总工程师等领导,共同出席并见证了合作协议签约仪式。新兴重工集团有限公司宁春林总经理和中国安全生产科学研究院吴宗之院长代表双方在合作框架协议上签字。

双方签订合作协议的主要目的是共同组建“应急救援产业技术创新战略联盟”和推进应急救援科技创新园的建设。“战略联盟”是根据北京市科委等部门联合发布的《关于促进产业技术创新战略联盟加快发展的意见》的精神而筹备建立,由企业、大学、科研机构等共同成立的技术创新合作组织;拟联合开展应急救援产业的科技成果转化与产业化促进、科技攻关、技术服务、品牌建设等工作。此外,双方还一致同意,在互惠、互助、互利的基础上,建立长期、稳定的科技合作关系,在科技成果转化、科技信息、产品研发、技术咨询等方面实现强强联合、优势互补,共同打造国内领先、国际一流的应急救援产业基地。