

贮库内偏二甲肼蒸发扩散数值模拟

黄智勇, 罗 锋, 施慧玮, 王煊军

第二炮兵工程学院, 西安 710025

摘要 采用 CFD 软件 Fluent 对贮库内偏二甲肼泄漏后液池蒸发扩散质量分数变化过程进行数值模拟, 分析研究了特定通风条件下贮库内气体运动规律和偏二甲肼连续扩散后的质量分数时空分布规律。结果表明, 机械排风、负压进风条件下, 贮库内气体呈现一定的循环流动; 高质量分数区域主要集中在进风口下方; 在 z 轴方向截面上偏二甲肼气体呈环形分布。

关键词 偏二甲肼; 质量分数分布; 数值模拟

中图分类号 V511

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.24.010

Numerical Simulation of Diffusion of Unsymmetrical Dimethylhydrazine Under Storage Condition

HUANG Zhiyong, LUO Feng, SHI Huiwei, WANG Xuanjun

The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China

Abstract This paper studies the diffusing characteristics and the concentration distribution of unsymmetrical dimethylhydrazine (UDMH) released on the ground and formed into a pool under the storage condition due to some causes. The change process of concentration of UDMH evaporated from the pool on the ground is numerically simulated with Fluent software by the Computational Fluid Dynamic (CFD) method. The movement of the storeroom-air and the space-time distribution characteristics of the concentration of UDMH evaporated continually under some specified aeration conditions are studied. It is shown that the effect of gravity on the dispersion is significant; under the condition of air exhaust by devices and air intake by subatmospheric pressure, the storeroom-air moves in cycles; high concentration areas are mainly under the air intake where the speed of air is low; in the cutter tip of z axis, UDMH is distributed in circles. These results can provide some food of thought for accident disposal.

Keywords unsymmetrical dimethylhydrazine; mass fraction distribution; numerical simulation

0 引言

可贮存的液体火箭推进剂在军事、航天领域广泛应用, 为了满足靶场试验和部队训练、作战需要, 必须贮存一定数量的氧化剂和燃烧剂^[1]。液体推进剂在贮存加注库房内作业过程中, 由于操作员的违章操作、误操作或设备故障、设备老化等原因^[2]会造成泄漏, 在地面上形成液池, 致使有毒推进剂气体在贮库内蒸发扩散, 如不及时处理或处理不当可能引发着火爆炸事故^[3]。偏二甲肼(UDMH)是国内最常用的液体火箭燃烧剂, 其气体分子质量比空气大^[4], 泄漏后易挥发形成重气, 且具有较高的毒性和易燃性^[5]。本文通过 CFD 软件 Fluent 对贮库内偏二甲肼泄漏后形成的液池蒸发扩散进行数值模拟, 得出了特定通风条件下的贮库内偏二甲肼气体扩散规律

和质量分数时空分布, 为事故后人员防护和制定及时有效的应急措施、救援预案提供一定的理论依据。

1 数值模拟

1.1 计算模型

以某单位的偏二甲肼推进剂贮库为背景, 适当简化后建立如下模型: 长 $\times$ 宽 $\times$ 高=9m $\times$ 3.2m $\times$ 2.6m, 库内有两个直径 2.6m、高 1.2m 的拱顶贮罐, 一侧库壁有一个 0.4m $\times$ 0.4m 的正方形排风口, 下沿距离地面 0.5m, 左沿距左侧壁 0.05m, 其对面的库壁处有一个直径 0.3m 的进风口, 中心距地面 1.95m、距右壁 0.5m。贮库内压强为 101325Pa, 环境温度为 293K, 相对湿度为 40%, 假定因意外发生泄漏, 在地面 (6.5, 1.4, 0) 处形

收稿日期: 2011-07-01; 修回日期: 2011-08-11

作者简介: 黄智勇, 副教授, 研究方向为特种环境监测及安全与环境工程, 电子信箱: lflvshw@163.com

成一个直径为 0.4m 的液池,如图 1(a)所示。

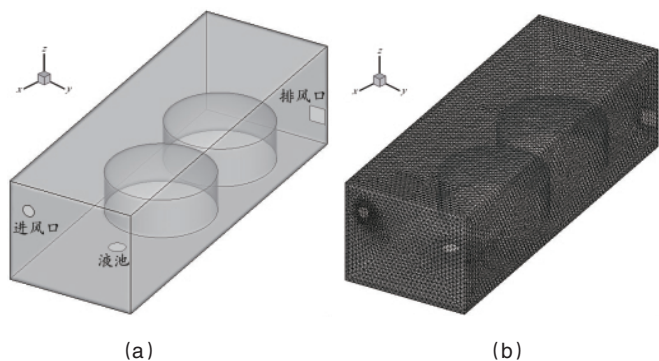


图 1 模型(a)及网格划分(b)

Fig. 1 Model (a) and meshes (b) of the storeroom

1.2 气体蒸发量的计算

根据文献[6]可知,贮存条件下偏二甲肼蒸发满足如下公式:

$$\nu_u = 2.60364 \gamma^{0.533} (0.001935 T^2 + 0.018988 T + 0.51181) \cdot (-2H^2 + 4.46H - 0.0265) \quad (1)$$

其中, ν_u 为偏二甲肼质量蒸发速率, mg/min; A 为蒸发面积, cm^2 ; γ 为蒸发表面风速, m/s; T 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; H 为环境相对湿度, %。

本文计算时选取 $\gamma=0.5\text{m/s}$, $T=20^{\circ}\text{C}$, $H=40\%$, 可得此条件下偏二甲肼的单位面积蒸发速率为 $4.26 \times 10^{-4} \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ 。又偏二甲肼的气体密度为空气的 2.1 倍^[7], 可计算出偏二甲肼的蒸发速度为 $2.75 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 。根据文献[8], 可以此作为蒸发扩散的入口边界条件。

1.3 控制方程组

1.3.1 基本控制方程

描述偏二甲肼气体在贮库内扩散过程的基本控制方程主要有质量、动量、能量和组分输运方程, 所有微分方程均可表示为如下一般形式^[9]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varphi) + \text{div}(\rho U \varphi - \Gamma_{\varphi} \text{grad} \varphi) = S_{\varphi} \quad (2)$$

其中, ρ 为密度, kg/m^3 ; φ 为不同的流体特征, 如质量通量、速度分量、能量和浓度等; S_{φ} 为单位体积源项; U 为速度, m/s ; Γ_{φ} 为 φ 的有效交换系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。

1.3.2 湍流模型

气体扩散领域应用最多的湍流模型是 $k-\varepsilon$ 模型^[10], 标准 $k-\varepsilon$ 模型是一个半经验公式, 主要是基于湍流动能和扩散率。 k 方程是一个精确方程, ε 方程可以通过经验公式导出。 Sklavounos 等^[11]比较了 4 种模型: $k-\varepsilon$ 模型 $k-\omega$ 模型剪切应力输运 (Shear Stress Transport Model, SST) 模型、SSG 模型在重气扩散数值模拟的结果, 发现 $k-\varepsilon$ 及 SST 两种模型的效果较好。本文计算采用标准 $k-\varepsilon$ 模型。

1.4 边界条件

本文在模拟分析中做了如下假设: (1) 贮库内的空气作

为不可压缩流体处理^[12], 呈湍流状态^[13-14]; (2) 假设湍流量在时间和空间内都是随机分布的, 具有统计规律性; (3) 根据 Boussinesq 假设, 使用湍流黏性系数 μ_t 表征大气的湍流性质; (4) 由于贮库的空气相对比较稳定, 因此不考虑大气稳定度的影响, 忽略推进剂气体与空气的温度差异。根据所建的模型尺寸, 使用 Gambit 前处理软件进行几何建模, 网格划分, 如图 1(b)所示。为了能够真实地反映偏二甲肼气体质量分数在贮库内的分布, 采用三维建模, 并忽略贮库结构等的影响。

边界条件: 进风口为一个大气压的压力入口, 扩散面为速度入口, 排风口为速度出口, 速度为 5m/s , 壁面采用标准壁面函数。组分影响采用化学组分传输模型^[15-16]。

2 计算结果及分析

为确保计算收敛, 除对残差曲线进行监测外, 还监测了进风口风速, 如图 2、图 3 所示。图 2 中残差曲线值均在 10^{-6} 以下, 说明收敛情况较好。图 3 中进风口风速逐渐趋于稳定, 也说明计算收敛情况较好。

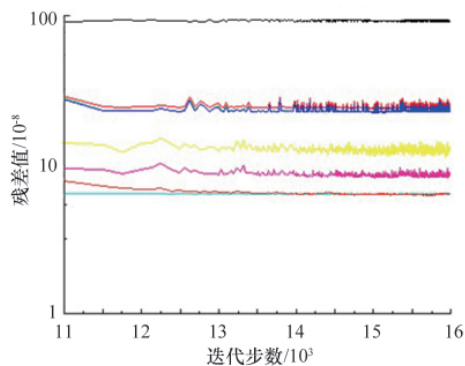


图 2 残差曲线

Fig. 2 Residual curve

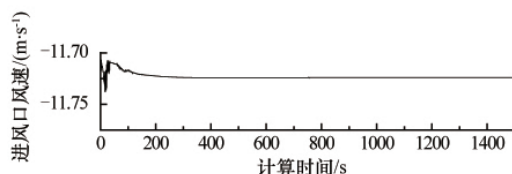


图 3 进风口风速

Fig. 3 Wind speed of air intake

2.1 贮库内气流分析

贮库在设计时考虑到偏二甲肼的高毒性、易燃性, 采取机械抽风、负压补风的通风方式^[7], 以避免正压补风造成的有毒偏二甲肼气体扩散到贮库以外的人员作业区域, 造成人员中毒等事故。由于机械抽风使得贮库内处于负压状态, 在大气压的作用下, 空气由进风口进入贮库。由于进出口存在面积差, 因此, 进风速度明显大于排风速度 (图 3)。图 4 为贮库内速度矢量分布图, 从中可以看出室内的气体流动路线。另外, 由于偏二甲肼气体密度大于空气, 扩散时主要沿地面扩散, 为防止将偏二甲肼气体吹散, 造成贮库内高质量分数区域过

大,将进风口设计在一定的高度位置。

图4中速度正值表示其方向沿 x 轴正向,负值表示沿 x 轴负向,从图中可以看出,空气从进风口进入贮库后,由于速度较高,形成射流,基本沿水平方向运动,进风截面逐渐变大,速度逐渐降低,并带动贮库内气体流动。受到库壁阻挡后沿着壁面向下和向右运动,一部分从抽风口排出贮库,另一部分再次碰壁后,沿地面和右壁面向 x 轴正向运动,进而带动地面液池蒸发出的偏二甲胍气体运动,触壁后向上运动,被进气流带走,如此循环。

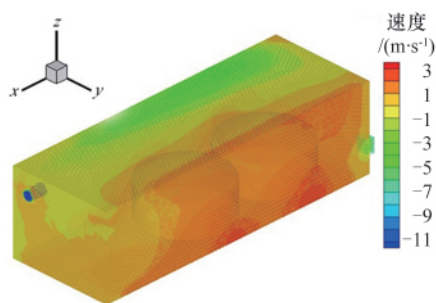


图4 贮库内速度矢量分布图

Fig. 4 Distribution of speed vector in the storeroom

2.2 贮库内偏二甲胍气体质量分数分布

图5为液池中心正上方1.5m处(A点)、液池中心沿 x 轴方向1.5m处(B点)、B点正上方1.5m处(C点),以及排风口中心处(D点)4个点的偏二甲胍质量分数随时间变化的曲线。从图中可以看出,各点的质量分数变化趋势基本一致,即从0逐渐升高到稳定值后基本保持不变。另外,由图5点A可以发现质量分数骤然升高,而后降低,再慢慢上升,可能是因为通风稀释了原先自由扩散到A点的偏二甲胍气体,使得气体质量分数下降,而后又逐渐升高直至稳定。另外点A、C处于同一高度,但平衡时质量分数却相差很大,进一步说明了贮库内气流的复杂性。出口处点D质量分数不再变化,说明液池蒸发的偏二甲胍量与出口排出的量相等,贮库内偏二甲胍量也基本保持恒定。图中亦可看出,在气体蒸发扩散500—600s时,库内质量分数分布达到稳定。

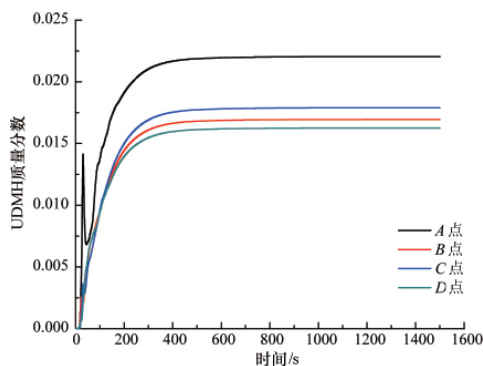


图5 不同点处UDMH质量分数随时间变化曲线

Fig. 5 Curve of UDMH mass fraction against time at different points

图6为不同时刻贮库内偏二甲胍的质量分数分布图,不同颜色对应不同的偏二甲胍质量分数范围。从图中可以清楚地看到,偏二甲胍气体向进风方向扩散,这点在定性缩比示踪实验中得到了验证。偏二甲胍的质量分数分布可以从侧面验证贮库内的气体运动规律,并可由此给予合理的解释。扩散50s时有毒气体尚未充满整个贮库,200s时就已经达到了很高的质量分数,说明偏二甲胍的挥发性和扩散性很强。库内偏二甲胍分布稳定时,质量分数均远大于10min应急暴露限值 240 mg/m^3 ,即质量分数 2.1×10^{-4} ,因此,人员进行应急处理时必须做好个人防护。质量分数较高区域基本位于进风口下方,主要是由于此处气流不畅,偏二甲胍气体积聚,不易扩散,因此可以将报警器安装在此位置。

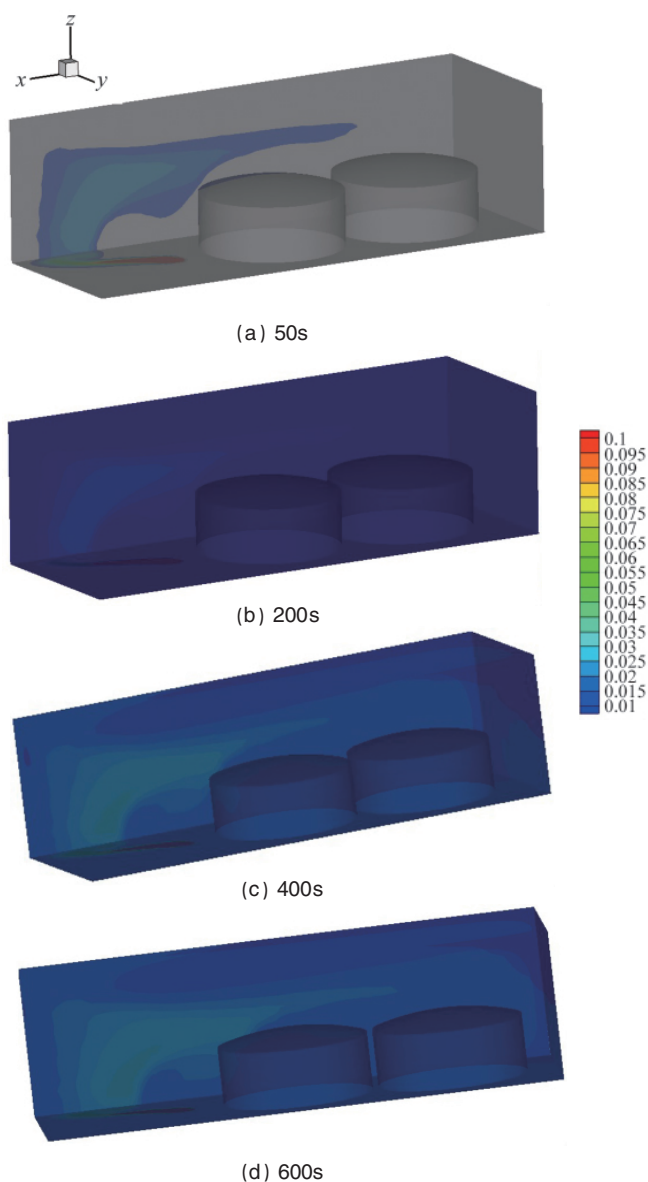


图6 不同时间贮库内UDMH质量分数分布

Fig. 6 Distribution of UDMH mass fraction in the storeroom at different instants

图7为贮库内偏二甲肼分布稳定后不同截面的质量分数分布,其中不同颜色代表偏二甲肼不同质量分数范围。从 $x=8\text{m}$ 截面可以看出在进风口空气射流附近偏二甲肼质量分数最低,且质量分数较高区域处于下方,验证了偏二甲肼的重气效应。从 $y=0.5\text{m}$ 截面可以观察到进气射流的运动情况与本文分析结果一致,亦可观察出偏二甲肼气体扩散的路径。在 $z=1.95\text{m}$ 处可以看出,在进气射流的影响下,库内偏二甲肼质量分数的分布成环状,中心区域因受气体流动的干扰较少,造成偏二甲肼的积聚,不易被稀释扩散,形成质量分数较高区域,在应急处理过程中,应尽量避免到达这些区域。

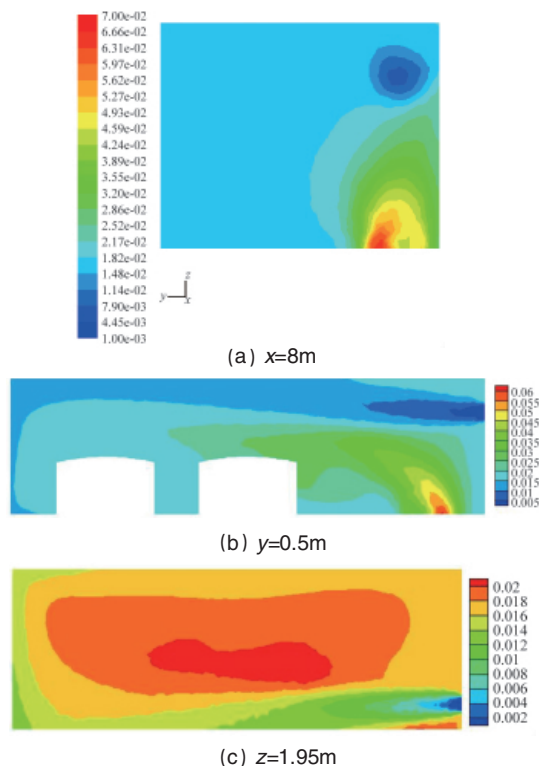


图7 稳定状态下不同库截面的UDMH质量分数分布
Fig. 7 Distribution of UDMH mass fraction of different sections under a stable condition

3 结论

通过对某偏二甲肼贮库内偏二甲肼蒸发扩散的数值模拟,研究了库内气体流动规律,并分析了偏二甲肼扩散过程的质量分数分布,可以得出如下结论。

(1) 特定的通风条件,使得贮库内气体流动呈现一定的循环状态,并存在一些气流干扰较小的区域。气流扰动大的区域,偏二甲肼稀释扩散较快,不易积聚,质量分数较低;气流干扰小的区域,偏二甲肼气体易积聚,形成高质量分数区域。

(2) 偏二甲肼气体属于重气范畴,扩散过程中表现出较强的重气效应,同时由于分子扩散运动和库内气流扰动使得整个贮库空间内均有偏二甲肼气体分布,且质量分数远大于应急暴露限值,应特别注意防护。

(3) 由于进气射流带走部分空气,在通风管下方形成了

一定的高负压区域,使得偏二甲肼气体向此方向运动并积聚,形成比较稳定的质量分数较高区域,可以在此处安装毒气报警器。

参考文献 (Reference)

- [1] 郑宏建. 液体火箭推进剂贮存技术[J]. 上海航天, 2001(5): 61-64.
Zheng Hongjian. *Aerospace Shanghai*, 2001(5): 61-64.
- [2] 韩启龙, 刘凤芹. 液体推进剂突发性泄漏事故的应急处置与污染控制[J]. 污染防治技术, 2008, 21(5): 66-70.
Han Qilong, Liu Fengqin. *Pollution Control Technology*, 2008, 21(5): 66-70.
- [3] 侯瑞琴. 液体推进剂泄漏时的安全疏散距离[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(6): 928-931.
Hou Ruiqin. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2010, 50(6): 928-931.
- [4] 黄琴, 蒋军成. 重气扩散研究综述[J]. 安全与环境工程, 2007, 14(4): 36-39.
Huang Qin, Jiang Juncheng. *Safety and Environmental Engineering*, 2007, 14(4): 36-39.
- [5] 高斯秘. 液体推进剂[M]. 北京: 宇航出版社, 1989.
Gao Simi. *Liquid propellant*[M]. Beijing: Aerospace Press, 1989.
- [6] 黄智勇, 陈兴, 平燕兵, 等. 贮存条件下偏二甲肼蒸发特性[J]. 导弹与航天运载技术, 2011(1): 58-61.
Huang Zhiyong, Chen Xing, Ping Yanbing, et al. *Missiles and Space Vehicles*, 2011(1): 58-61.
- [7] 车著明. 推进剂泄漏后的扩散模式分析[J]. 航天发射场, 2004(3): 11-18.
Che Zhuming. *Spacecraft Launching Complex*, 2004(3): 11-18.
- [8] 魏利军. 重气扩散过程的数值模拟[D]. 北京: 北京化工大学, 2000.
Wei Lijun. Numerical simulation of heavy gas dispersion[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technological, 2000.
- [9] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
Tao Wenquan. *Numerical heat transfer* [M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- [10] 任志安, 郝点, 谢红杰. 几种湍流模型及其在FLUENT中的应用[J]. 化工设备技术, 2009, 30(2): 38-40.
Ren Zhi'an, Hao Dian, Xie Hongjie. *Chemical Equipment Technology*, 2009, 30(2): 38-40.
- [11] Sklavounos S, Rigas F. Validation of turbulence models in heavy gas dispersion over obstacles[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, 10(1-2): 9-20.
- [12] 李文科. 工程流体力学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2007.
LI Wenke. *Engineering fluid mechanics*[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2007.
- [13] Sorensen D N, Nielsen P V. Quality control of computational fluid dynamics in indoor environments[J]. *Indoor Air*, 2003, 13(1): 2-17.
- [14] Nielsen P V. Computational fluid dynamics and room air movement[J]. *Indoor Air*, 2004, 14(S7): 134-143.
- [15] 黄琴, 蒋军成. 重气泄漏扩散实验的计算流体力学(CFD)模拟验证[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(1): 50-55.
Huang Qin, Jiang Juncheng. *China Safety Science Journal*, 2008, 18(1): 50-55.
- [16] Matsuura K, Kanayama H, Tsukikawa H, et al. Numerical simulation of leaking hydrogen dispersion behavior in partially open space[J]. *International Journal of Hydrogen*, 2008, 33(1): 240-247.
- [17] 唐志文, 刘瑞萍. 氧化剂和燃烧剂长期贮存安全性分析及确保安全措施[C]//中国化学会第三届全国化学推进剂学术会议论文集. 北京: 中国化学会, 2007.
Tang Zhiwen, Liu Ruiping. The analysis of safety of long-time storage of oxidant and incendiary agent and some measures to ensure the safety[C]// Third National Conference on Chemical Propellant. Beijing: Chinese Chemical Society, 2007.

(责任编辑 林祥磊)