

桶灌室 CS₂ 气体连续泄漏扩散的三维数值模拟

李其朋¹, 吴海军¹, 周素华², 隆 康², 谭雅仙²

(1. 浙江科技学院 机械与能源工程学院, 杭州 310023; 2. 杭叉集团股份有限公司, 杭州 311305)

摘 要: 以某 CS₂ 桶罐储存室为对象, 利用 Fluent 软件对 CS₂ 连续泄漏扩散进行数值模拟, 研究 CS₂ 扩散规律及影响因素。结果表明: 无风状态下, CS₂ 扩散速度较小, 以泄漏源为中心沿四周近地面扩散且易在墙角积聚; 障碍物的存在对 CS₂ 扩散速度有一定的阻碍作用; 不同的泄漏位置形成的 CS₂ 爆炸极限范围不同, 水平泄漏比垂直泄漏更易积聚, 更危险; 不同通风速度对 CS₂ 扩散速度影响较大, 通风速度越大, 泄漏危险域越小。研究结果可对 CS₂ 桶罐储存室内 CS₂ 泄漏扩散的危险域进行有效预测, 为泄漏预警装置安装、防爆叉车主动防护系统的构建及泄漏事故应急方案提供参考。

关键词: CS₂; 泄漏; 数值模拟; 主动防护系统

中图分类号: TE882

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2018)03-0205-06

Three dimensional numerical simulation of CS₂ gas continuous leakage and diffusion in a bucket chamber

LI Qipeng¹, WU Haijun¹, ZHOU Suhua², LONG Kang², TAN Yaxian²

(1. School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 2. Hangcha Group Co., Ltd., Hangzhou 311305, Zhejiang, China)

Abstract: Taking a CS₂ tank storage room as an object, numerical simulation of CS₂ continuous leakage and diffusion was carried out by using the software Fluent, in pursuit of the CS₂ diffusion law and its influencing factors. The results show that under the wind-free condition, CS₂ centers around the leakage source, and diffuses at a lower velocity near the ground and tends to accumulate in the corner. The presence of obstacles has a certain impediment to the diffusion velocity of CS₂. The CS₂ explosion limit range differs from horizontal leakage to vertical leakage, the former being more prone to accumulation and more hazardous than the latter. Different ventilation rates have a great influence on the CS₂ diffusion velocity, and the greater the ventilation rate is, the smaller the hazardous area of leakage is. The results could

收稿日期: 2017-10-15

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2015DFR71160); 浙江科技学院研究生科研创新基金项目(2016YJSKC010)

通信作者: 李其朋(1977—), 男, 山东省临邑人, 教授, 博士, 主要从事工业车辆主动安全研究。E-mail: lqp@zju.edu.cn。

effectively predict the hazardous area of CS_2 leakage and diffusion inside the CS_2 tank storage room, and provide references for installation of the leakage alarm device, construction of the forklift active protection system and accident emergency plan.

Keywords: CS_2 ; leakage; numerical simulation; active protection system

随着世界经济与科技的迅猛发展,特别是石油和化工原料品种的不断增多,生产、运输和仓储等存在爆炸性气体安全隐患的场所也在不断扩大,其中桶罐区的危险重质气体泄漏导致的事故频繁发生。为保证安全高效的生产,世界各国正致力于主动提高具有防止爆炸的仓储运输车辆和叉车的应用及防爆性能。目前的研究主要集中在以 CO_2 为代表的重质气体泄漏方面,如肖淑衡等^[1]用 CO_2 模拟危险性重质气体做空间泄漏扩散实验,周宁等^[2]利用 CO_2 模拟罐区重质气体泄漏扩散的基本规律,宋黎等^[3]以 CO_2 作为示踪气体研究室内有害气体浓度场分布。针对一种特定的重质气体进行研究的较少,尤其对 CS_2 的泄漏扩散研究。 CS_2 作为一种特殊的重质气体,通常作为添加剂、溶剂和磺化剂应用于石油化工领域,具有高易燃性及高神经毒性,属于危险品^[4]。它的蒸气压为 53.32 kPa/28 °C,熔点为 -110.8 °C,相对分子质量为 76.14,相对密度 2.64(空气=1),在常温下易挥发,与空气形成爆炸极限为 1.3%~50%爆炸性混合物,静电荷、火星、高温、氧化剂等因子都会使 CS_2 有燃烧危险^[5]。因此当事故发生后无法准确预测事故影响范围与后果。针对以上情况,本研究采用 Fluent 软件对 CS_2 桶罐储存室进行 CS_2 气体泄漏的数值模拟计算,研究在障碍物存在、不同通风速度、不同泄漏口等条件下 CS_2 泄漏扩散的规律及其浓度分布情况,为防爆叉车上传感器合理的空间布局,以及制定防火防爆措施提供参考。

1 泄漏扩散模型

从 20 世纪中后期至今,国内外学者一直在危险气体泄漏扩散的模拟研究方面不断地探索前行,其间提出了许多扩散计算模型,如 BM 模型^[6]、Gaussian 模型^[7]、箱及相似模型^[8]、Sutton 模型^[9]和浅层模型^[10]等。国内学者借鉴前人的经验并通过自身研究,提出了板块模型^[11],这些模型都适用于模拟气体泄漏扩散。其中 Gaussian 模型适用于点源扩散,以统计学方法为基础研究扩散质的浓度分布,它的优点是开发较早,技术较成熟,模型简单,便于计算,应用广泛;缺点是只适用于轻质气体扩散且误差大。BM 模型通过大量简单关系式和图表来描述扩散行为,作为筛选的基准模型适用于中性或重质气体研究。Sutton 模型采用湍流扩散统计理论,只适用于中性气体,而且精度较低。箱及相似模型在概念清晰、计算精度等方面优于 Gaussian 模型,尤其是重质气体的扩散模拟,但模型通常涉及不连续界面,存在较大的不确定性。

上述的理论模型都有其适用范围和局限性,而三维传递现象模型运用 CFD 方法模拟^[12],通过数值求解室内空气流动的质量、动量、能量和危险气体扩散的控制方程^[13],得到危险气体浓度分布情况,特别适用于重质气体的模拟。因此本研究采用三维传递现象模型对 CS_2 气体的扩散过程及影响因素进行研究。

1.1 数学模型

1.1.1 控制方程

连续、动量、能量方程^[14]求解方法如下。

连续性方程(质量守恒方程):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

式(1)中: ρ 为密度, kg/m^3 ; u_x 、 u_y 、 u_z 分别为 x 、 y 、 z 3 个方向的速度分量, m/s ; t 为时间, s 。

可压缩性流体的动量方程:

$$\rho \frac{du_x}{dt} = \rho f_x + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right], \quad (2)$$

$$\rho \frac{du_y}{dt} = \rho f_y + \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial y}{\partial y} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right], \quad (3)$$

$$\rho \frac{du_z}{dt} = \rho f_z + \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right]. \quad (4)$$

式(2)~(4)中: f_x 、 f_y 、 f_z 分别为 x 、 y 、 z 3 个方向的摩擦力分量; μ 为流体与壁面摩擦系数。

能量方程:

$$\nabla \cdot [k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\tau_{\text{eff}} \cdot \mathbf{u})] = \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{u}(\rho E + p)]. \quad (5)$$

式(5)中: h_j 为组分 j 的焓, J/kg, $h_j = \int_{T_{\text{ref}}}^T C_{p,j} dT$, 其中 $T_{\text{ref}} = 298.15$ K; k_{eff} 为有效热导系数, W/(m·K); k_t 为湍流热传导系数; J_j 为组分 j 的扩散通量; E 为流体微团的总能量, J/kg, 为内能、动能、势能三者之和, 即 $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2}$, 其中 h 为焓, J/kg; \mathbf{u} 为速度矢量。

标准 k - ϵ 模型^[14]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} + G_b) \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{u_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon. \quad (7)$$

式(6)~(7)中: k 为湍流脉动动能; ϵ 为湍流脉动动能的能耗率; σ_k 、 σ_ϵ 分别为不同普朗特数, Fluent 中默认值分别为 1、1.3; G_k 与平均速度梯度引起的湍动能有关; G_b 与浮力影响引起的湍动能有关; Y_M 由湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响决定; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 为经验值, Fluent 中一般取值为 1.44、1.92、0.09。

桶灌室 CS₂ 泄漏扩散可认为是多组分气体相互作用的湍流, 因此除上述基本方程外还需多组分输运方程来模拟 CS₂ 泄漏扩散过程。

组分输运方程^[15]:

$$\frac{\partial(\rho c_a)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i c_a) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_a \frac{\partial(\rho c_a)}{\partial x_i} \right). \quad (8)$$

式(8)中: c_a 、 ρc_a 、 D_a 分别代表组分 a 的体积分数、质量分数和扩散系数。

1.1.2 二硫化碳流动特性

马赫数是气体流动速度与音速的比值, 记为 O , 在本研究中, 马赫数小于 0.4, 即低速扩散流动, 因此 CS₂ 气体流动时需满足如下流动特性方程^[16]:

$$\frac{dA}{A} = (O^2 - 1) \frac{dv}{v}. \quad (9)$$

式(9)中: dA 为流管横截面积的微变化值; dv 为气流速度的微变化值。

1.2 物理模型

以某 CS₂ 桶灌储存室为研究对象, 数值模拟物理模型见图 1, 尺寸为 20 m × 12 m × 8 m。假定图 1 中 4 个矩形框分别为多个 CS₂ 桶灌规则摆放的桶灌区, 其尺寸为 3 m × 4.5 m × 1.8 m, 通风口大小为 3 m × 3 m, 出风口为 3 m × 1.8 m, 泄漏直径为 20 cm。泄漏口坐标分别为 A(7.5, 8.5, 0.9)、B(6.25, 7.5, 0.9)、C(6.25, 9.5, 0.9)、D(3, 8.5, 0.9)、E(14.75, 8.5, 0.9)、F(6.25, 8.5, 1.8), 除泄漏口所在的桶灌区外, 其余桶灌区都视为障碍物存在。

1.2.2 边界条件

数值模拟的成败首先在于给定模型计算域的大小及

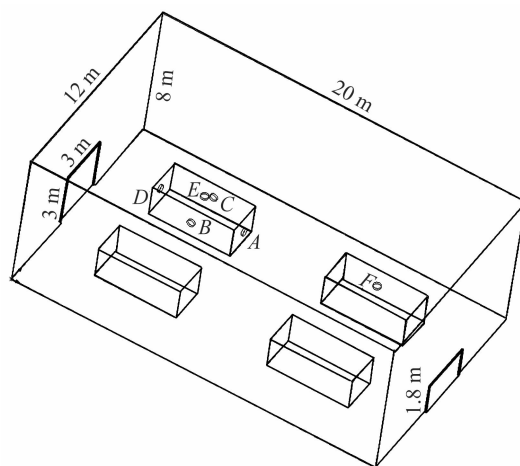


图1 数值计算物理模型

Fig. 1 Numerical computational physics model

相关壁面的边界条件,同时不同的气体存在物理和化学性质上的差异,因此不同气体泄漏扩散的边界条件是不同的。以存储 100% 质量分数的二硫化碳桶罐室作为研究对象,分别以 A、B、C、D、E、F 6 个不同的泄漏口作为 CS_2 泄漏的单源头,对整个室内空间进行 CS_2 气体泄漏扩散模拟计算。

边界条件设定如下:1)进口边界条件,将泄漏口设置为质量入口,以泄漏速率为 0.1376 kg/s 非稳态连续泄漏,方向垂直于入口截面;2)出口边界条件,压力出口为通风口和出风口,压强为一个标准大气压,设气流方向为水平方向;3)通风条件,利用大功率风扇强制对流扩散;4)壁面条件。采用标准壁面函数处理,设置壁面类型为 wall,温度为 300 K ,室内外不存在热传递。

2 数值模拟与分析

2.1 CS_2 泄漏扩散的基本规律

本研究针对泄漏口距地面 0.05 m 的平面爆炸区域进行对比,图 2 是在障碍物影响下 A 处泄漏口经过 500 s 后的 CS_2 爆炸区域示意图。在无障碍物时,由于泄漏气体在初速度及重力的作用下,以泄漏口为中心沿四周地表扩散, CS_2 桶罐储存室地表空间基本处于危险区,尤其靠近泄漏口一侧较为严重;而在障碍物存在的情况下, CS_2 爆炸区域范围比无障碍物形成的要大,且各区域 CS_2 的积聚情况更严重。这是由于障碍物的存在对障碍物周围的气流运动产生了影响,即改变了 CS_2 气体的扩散路径,同时由于 CS_2 相对分子质量是空气的 2 倍多,一般沿地面扩散,障碍物的存在,使 CS_2 气体扩散空间减少,扩散阻力增大,易积聚在障碍物周围。同时根据空气动力学,高浓度区的气体会向低浓度区运动,即 CS_2 气体会绕过障碍物向前进行扩散运动,因桶罐区内墙壁具有阻碍作用,促使 CS_2 气体往障碍物后侧方流动。这说明障碍物的存在短期内会增速滞留 CS_2 气体,同时也增大了 CS_2 桶罐区潜在的局部易爆区域面积。

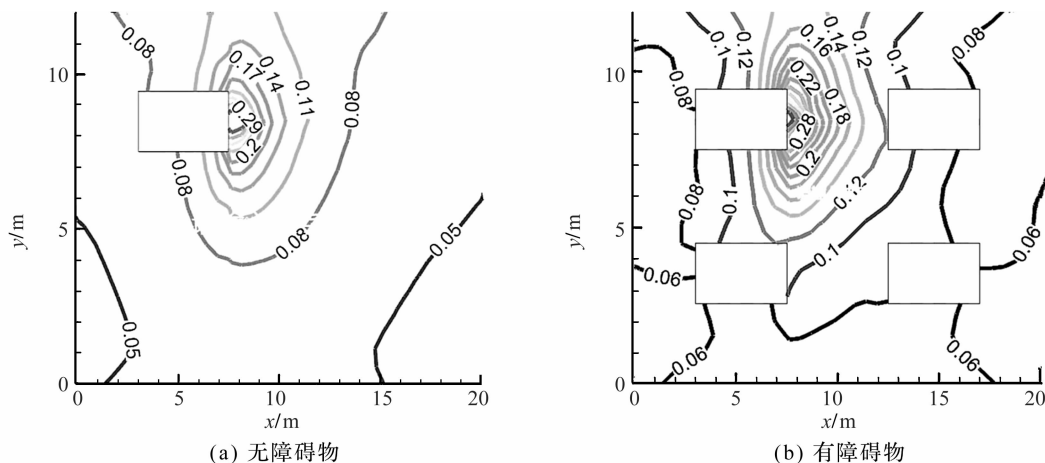


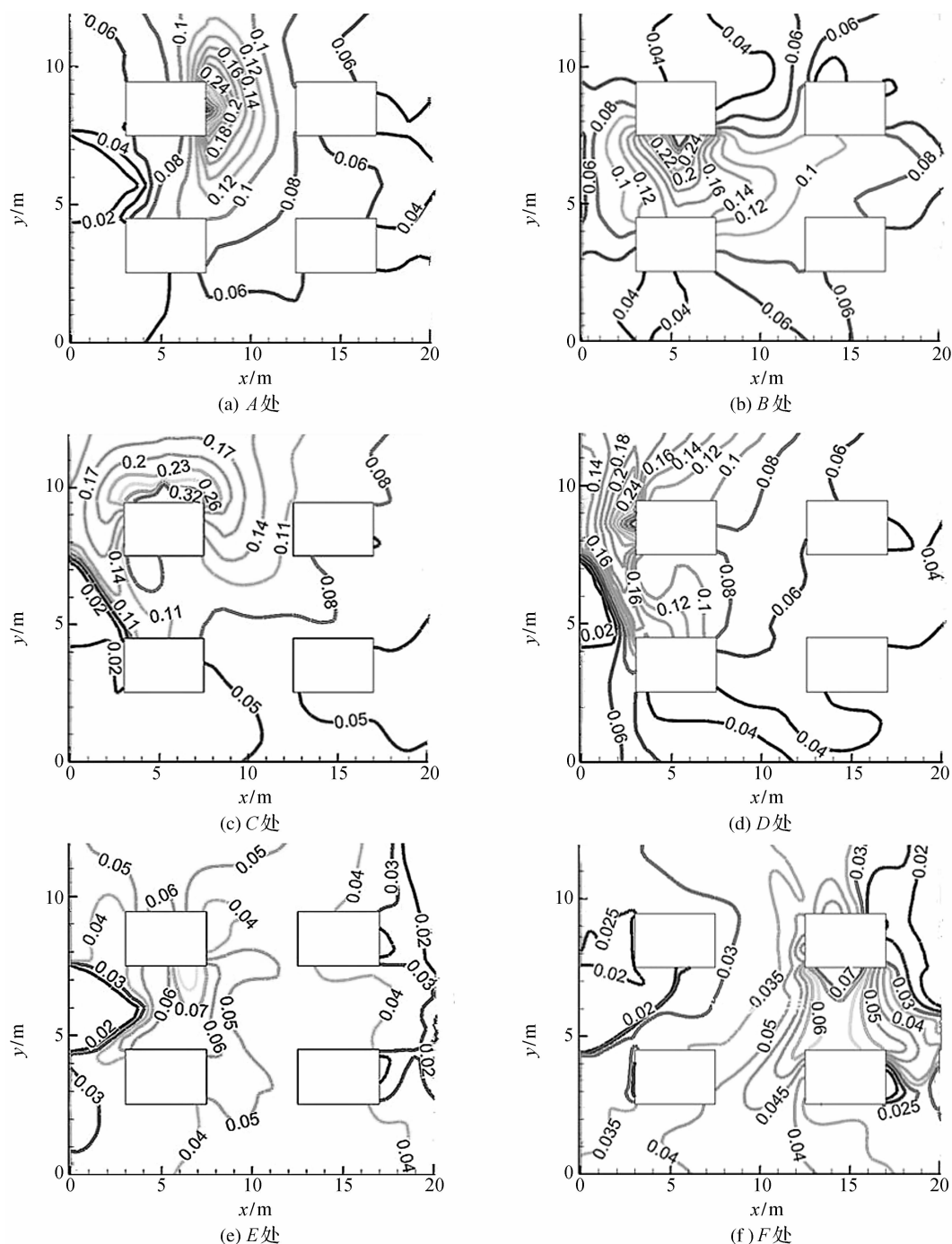
图 2 A 处泄漏经过 500 s 后有无障碍物爆炸浓度区域

Fig. 1 Area of explosive concentration after 500 s at the location of A when obstacles being present or absent

2.2 泄漏位置对 CS_2 扩散过程的影响

分别取 A、B、C、D、E、F 6 个位置作为泄漏源,泄漏速度为 0.01374 kg/s ,持续泄漏时间为 500 s ,入口风速为 1 m/s 。由图 3 可知,当 CS_2 桶罐区分别从 A、B、C、D 4 个水平方向泄漏时,由于 CS_2 的重质效应, CS_2 泄漏口附近地表快速积聚,易使其浓度达到爆炸极限范围,提高 CS_2 桶罐储存室爆炸的危险系数,从通风口到出风口整个 CS_2 桶罐区危险气体的含量先增大后减小。

当 E、F 处发生泄漏时, CS_2 桶罐储存室大部分空间都处在爆炸极限范围内,但 CS_2 的含量较低,这是由于在 E、F 处泄漏,泄漏气体本身的初始势能较大,同时受重力作用,将势能转化成动能,泄漏气体的扩散速度相对于水平泄漏口较快,不易在局部地区积聚。

图3 经过500 s后各处泄漏的CS₂含量爆炸区域Fig. 3 Explosive area of CS₂ concentration at different locations after 500 s

2.3 通风速度对CS₂扩散过程的影响

取A作为泄漏源,泄漏方向与通风口方向一致,通风口风速 v 分别为0、1、3、5 m/s,泄漏速度为0.013 74 kg/s,持续泄漏时间为500 s。由图4可知,随着通风速度的增大,泄漏气体达到爆炸的含量之区域面积明显缩减,且爆炸的CS₂含量区域对应泄漏气体的含量也有明显的降低,主要集中在泄漏源一侧,说明高的通风速度有利于泄漏气体的扩散,减少泄漏气体危险域。这是由于泄漏气体在扩散过程中受到外界风速的干扰,室内空气的流动不断卷吸泄漏气体,提高了稀释泄漏气体的速度,在空气气流的作用下能加快从出风口排除,同时通风口和出风口连线之间无障碍物,风速会加快此处气流运动,阻碍泄漏气体往另一侧扩散,风速越大,阻碍作用越大。

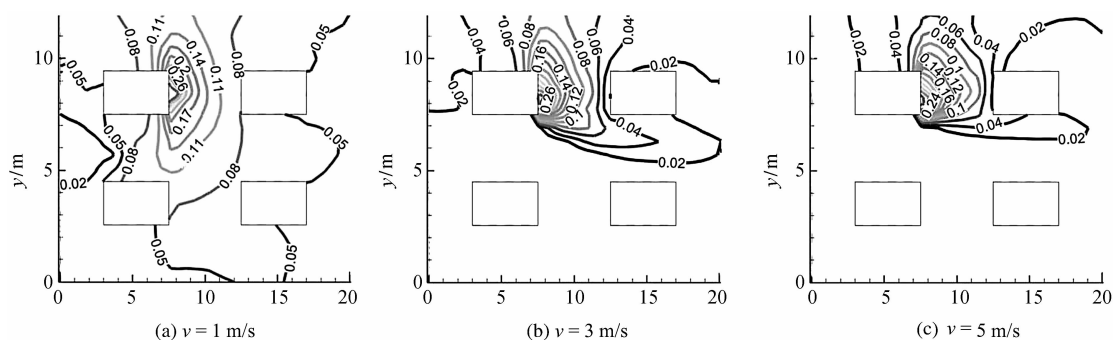


图 4 经过 500 s 后不同速度的 CS_2 含量爆炸区域

Fig. 4 Explosive area of CS_2 concentration at different velocities after 500 s

3 结 论

本研究运用 Fluent 软件分别从障碍物、泄漏口位置、通风速度不同角度模拟分析 CS_2 气体在桶罐室泄漏扩散情况,得到相关规律及建议如下。

1) CS_2 气体的扩散方式具有重质气体沿地表扩散、速度慢等基本特征。2) 当 CS_2 桶罐储存室存在障碍物时,对 CS_2 气体扩散具有阻碍作用,泄漏的 CS_2 气体易积聚在障碍物周围,增大了爆炸事故发生的概率。3) 不同泄漏口形成的爆炸区域不同, CS_2 气体沿着桶罐区四周泄漏时, CS_2 气体局部积聚较严重,整个 CS_2 桶罐储存室基本处在爆炸极限范围内;而沿着垂直方向泄漏时, CS_2 气体扩散速度较快,在整个 CS_2 桶罐储存室分布较均匀且含量较低。4) 在一定风速范围内, CS_2 气体的扩散速度与风速大小成正比相关,随着风速的增加,达到 CS_2 气体爆炸极限的范围越来越小。5) 综合 CS_2 泄漏扩散的基本情况,可以将 CS_2 传感器多点位,低平面(窄幅垂直面)合理布局在防爆叉车上。6) 利用障碍物易改变流场作用与 CS_2 的易积聚特性,可以筑堤堵截泄漏二硫化碳或者引流到安全地点。

鉴于 CS_2 的危险性及试验设施的缺乏,无法进行真实状态下 CS_2 泄漏扩散实验,仿真结果势必与现实情况存在一定偏差。因此,如有条件在安全措施完备的情况下,可以进行试验,获取真实数据。本文的研究思路与结论可以为其它危爆气体的主动检测提供借鉴。

参考文献:

- [1] 肖淑衡. 厂区燃气等危险性气体泄漏扩散的模拟研究[D]. 广州: 广州大学, 2006.
- [2] 周宁, 崔伟, 潘东. 罐区重质气体泄漏扩散的数值模拟分析[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2013, 25(3): 28.
- [3] 宋黎, 柯佳雄, 刘峰. 室内有毒有害气体扩散的数值模拟[J]. 暖通空调, 2006(9): 12.
- [4] 腊军志. 二硫化碳泄漏处理及火灾扑救中相关问题探讨[J]. 辽宁科技学院学报, 2009, 11(3): 25.
- [5] 李续融, 柳知非, 庞德红. 二硫化碳废气治理技术及其展望[J]. 污染防治技术, 2010(5): 72.
- [6] 王建. 储罐区可燃气体泄漏扩散模拟及爆燃灾害评估[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [7] 王志荣, 蒋军成, 潘旭海. 模拟评价方法在劳动安全卫生预评价中的应用研究[J]. 石油与天然气化工, 2003, 33(3): 181.
- [8] ULDEN A V. On the spreading of a heavy gas released near the ground[C]//Proceedings of First International Loss Prevention Symposium. Amsterdam: Elsevier, 1974: 221.
- [9] 殷柯欣, 姜会林, 佟首峰. 基于 Sutton 模型研究气动光学效应(英文)[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 689.
- [10] 胡世明, 张政, 魏利军, 等. 危险物质意外泄漏的重气扩散数学模拟(1)[J]. 劳动保护科学技术, 2000(2): 31.
- [11] 丁信伟, 王淑兰, 徐国庆. 可燃及毒性气体泄漏扩散研究综述[J]. 化学工业与工程, 1999, 16(2): 119.
- [12] FESTUAL H E. COMIS: an international multizone airflow and contaminant transport model[J]. Energy and Buildings, 1999, 30(1): 3.
- [13] 魏利军, 张政, 胡世明, 等. 重气扩散的数值模拟[J]. 中国安全科学学报, 2000, 10(2): 30.
- [14] 朱红钧. FLUENT 15.0 流体分析实战指南[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015.
- [15] 薛海强, 张增刚, 田贯三, 等. 有障碍物空间可燃气体扩散规律的数值模拟[J]. 天然气工业, 2010, 30(5): 119.
- [16] 杨仲泉, 全雄伟, 刘亮, 等. 核电厂厂区实验室乙炔泄漏扩散过程的数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(6): 32.