

船舱 CO₂ 泄漏模拟分析^①

李 席^{1,2}, 史正波³, 程醒龙¹, 朱林林¹, 李宗群¹, 王传虎^{1,*}

(1. 蚌埠学院 硅基新材料安徽省工程技术研究中心, 安徽 蚌埠 233030; 2. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094;

3. 蚌埠市神舟机械有限公司, 安徽 蚌埠 233030)

摘 要: 基于计算流体力学对船舱 CO₂ 泄漏扩散进行模拟, 探究了泄漏速度、障碍物高度和倾斜角对泄漏扩散的影响。结果表明: CO₂ 泄漏速度越大, 向船舱底部沉积愈明显, 气体扩散的范围越大, 人逃生时间越短; 增加障碍物的高度可显著增加对船舱 CO₂ 泄漏的阻碍作用; 向左倾斜 45°的障碍物阻碍效果最佳, 向右倾斜 45°的障碍物, 下风向高浓度 CO₂ 区域最大, 人员逃生越困难。模拟结果可为船舱 CO₂ 泄露事故预防提供参考。

关键词: 船舱; CO₂; 泄露; 障碍物; 模拟

中图分类号: X965 **文献标识码:** A

0 引 言

船舶工业是国家经济的命脉之一, 二氧化碳灭火系统在船舱中广泛应用^[1]。近年, 因二氧化碳的储存、使用不当可能导致二氧化碳泄漏事故较多, 造成人员伤亡及严重的经济损失^[2-4]。因此, 对船舱二氧化碳泄漏扩散研究分析有重要意义。

顾帅威^[5]、刘恩斌^[6]、Kang Li^[7]等研究了超临界 CO₂ 管道泄漏特性。钱新明^[8]等阐述管道输送二氧化碳泄漏模型研究进展, 提出了 CO₂ 管道泄漏的计算模型。陈兵等^[9]利用软件模拟研究了含杂质 CO₂ 管道输送泄漏扩散规律。

以上研究侧重于 CO₂ 在管道内及向开放空间泄漏扩散的研究, 对于相对封闭空间的船舱 CO₂ 泄漏扩散研究涉及较少, 因此, 本文采用计算流体力学软件探究船舱二氧化碳泄漏影响因素(泄漏速度、障碍物高度和倾斜角), 为船舱 CO₂ 泄漏事故产生、预防及处置提供参考。

1 计算模型

1.1 基本假设和控制方程

为简化分析, 做出如下基本假设:

- (1) 整个过程没有热量传递;
- (2) 在泄漏过程中, 不发生相态变化和化学反应;
- (3) 二氧化碳泄漏速度不随着时间变化而变化。

船舱 CO₂ 泄露扩散遵循的基本方程有连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程和组分输运方程, 湍流模型选择标准 $k-\varepsilon$ 控制方程^[9-10]。

1.2 初始条件

建立 2D 船舱物理模型, 如图 1 所示。计算区域为长 5m × 高 2.4m^[11], 距离船舱底部 0.9m 有直径 11mm^[12] 泄漏孔, 泄漏孔对侧靠近船舱顶部有高度 400mm 通风口。为了更加二氧化碳泄漏扩散的影响, 在计算区域设置测点, 测点的高度设置为人的呼吸器官所在高度 1.5m^[13], 测点坐标列于表 1 中。

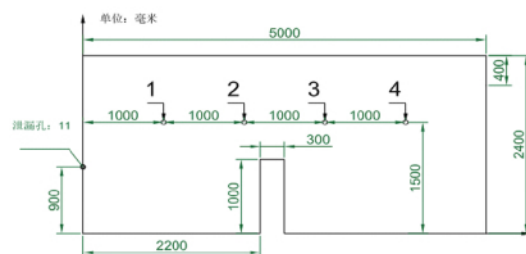


图 1 船舱二氧化碳泄漏物理模型

① 收稿日期: 2020-11-02

基金项目: 安徽省高等学校省级质量工程项目虚拟仿真实验教学项目(2019xfxm79, 2018xfsyxm009); 安徽省高校自然科学基金研究项目(KJ2019A0859); 蚌埠学院质量工程项目(2019JYXML15, 2019JYXML19, 2020jyxm20)。

作者简介: 李席(1989-), 男, 安徽蚌埠人, 博士, 讲师, 研究方向: 安全工程教学及化工安全研究。

通讯作者: 王传虎(1962-), 男, 安徽凤阳人, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向: 固体废弃物综合利用、化工安全。

表 1 测点坐标

测点序号	1	2	3	4
测点坐标/m	(1, 1.5)	(2, 1.5)	(3, 1.5)	(4, 1.5)

模型网格采用四边形网格,在泄漏孔附近网格的最大尺寸为 0.0005m,其它部分的最大网格尺寸为 0.02m。通风口设置为压力出口,泄漏孔设置为速度进口,其余边设定为墙(WALL)。

2 模拟结果与讨论

2.1 船舱 CO₂ 泄漏过程

图 2 是泄漏速度为 3m/s 时,竖直障碍物高为 1m,60s 内的气体扩散过程中不同时间节点的 CO₂ 质量分数空间分布图。

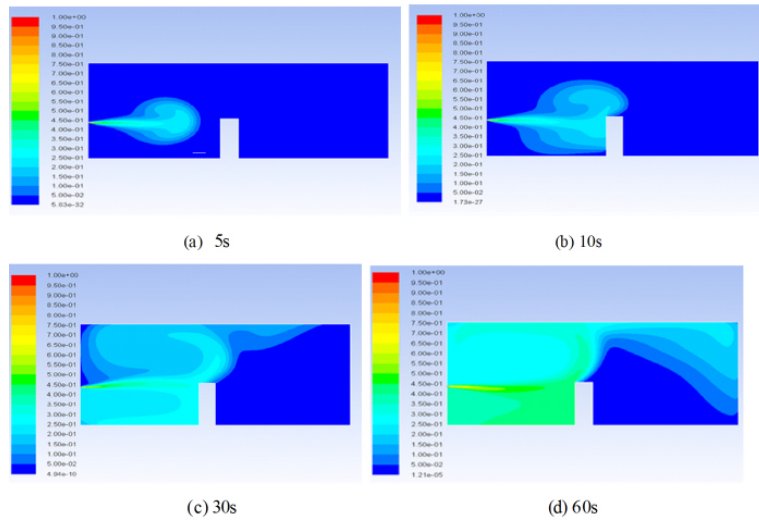


图 2 不同时刻船舱 CO₂ 质量分数空间分布

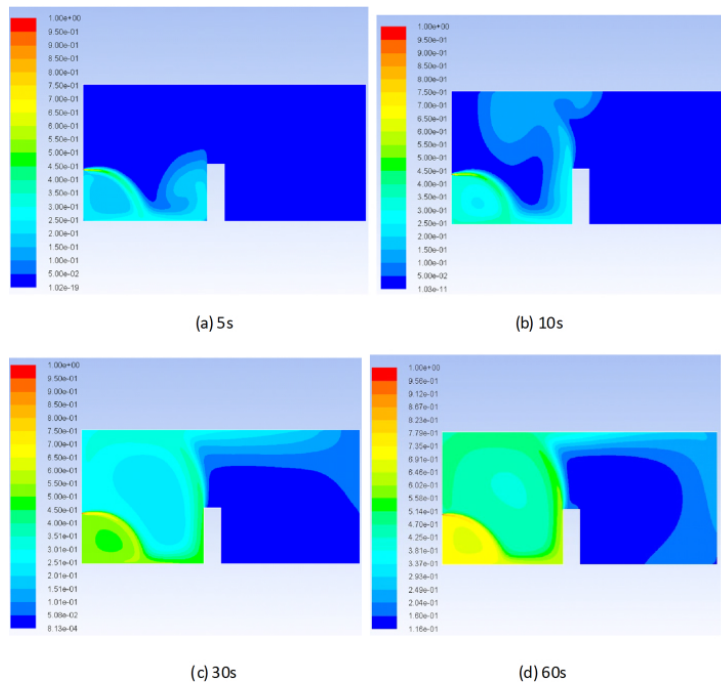


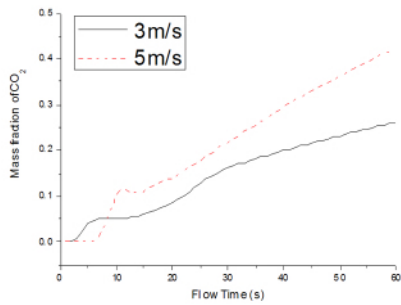
图 3 泄漏速度为 5m/s 不同时刻船舱 CO₂ 质量分数空间分布

由图 2 可知,船舱二氧化碳泄漏时,初始阶段形成射流,由于空气阻力和稀释,逐渐发展成球形气云,因二氧化碳是重气气体,所以球形气云下半部分的质量分数要高于上半部分。泄漏的二氧化碳气

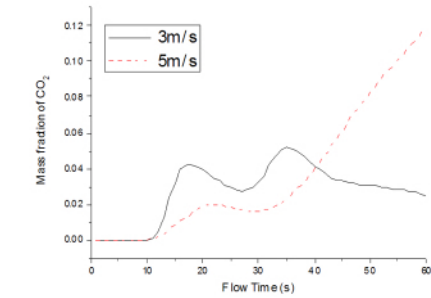
云遇到障碍物改变运动方向,一部分气云沿着障碍物爬升,气云回流现象及靠近船舱底部沉积明显,由于船舱壁面约束、横向和纵向涡旋等共同作用,障碍物背面存在空腔区^[10],该区域利于人员逃生。

2.2 泄漏速度

图3是CO₂泄漏速度为5m/s,其他条件一致

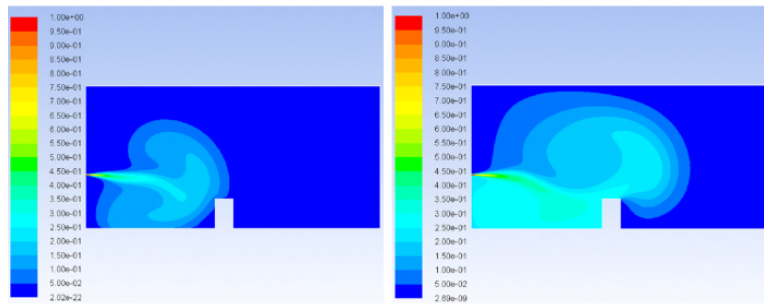


(a) 测点1



(b) 测点3

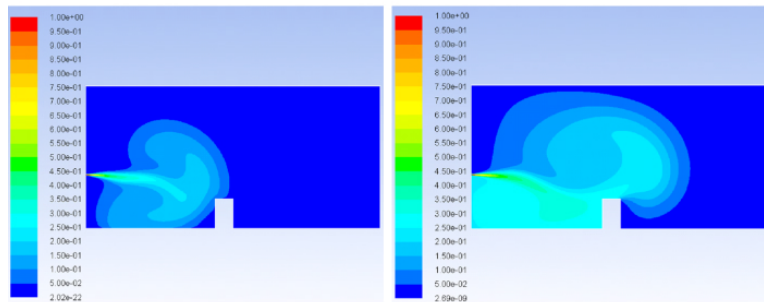
图4 泄露速度5m/s时不同测点的CO₂质量分数分布



(a) 10s

(b) 30s

图5 障碍物高0.5m不同时刻CO₂质量分数空间分布图



(a) 10s

(b) 30s

图6 障碍物高1.5m不同时刻CO₂质量分数空间分布

分析图2~图4可知,CO₂泄漏的速度由3m/s增加至5m/s时,受重力沉降向下堆积越明显,相同时间内CO₂气体释放量更大,靠近障碍物前形成更高浓度区域,进而出现气云沿船舱底面回流的现象愈明显,CO₂泄漏速度3m/s比5m/s更早达到测点1,达到使人致命的CO₂浓度(0.1)^[14]时间更缓慢,随后形成的高浓度区域更小。当泄露的CO₂气云越过障碍物后,CO₂泄露速度越大,在障碍物背面形成空腔区越靠近船舱顶部,随后形成的高浓度区域越大,留给人的逃生时间越短。

时的扩散过程云图,图4为泄露速度5m/s时不同测点的CO₂质量分数分布。

2.3 障碍物高度

图5和图6分别是CO₂泄漏速度为3m/s,障碍物高度分别为0.5m^[15],1.5m二氧化碳质量分数空间分布图,图7为不同障碍物高度时测点二氧化碳质量分数变化曲线。

由图2、图5~图7分析可知,随着障碍物高度的增加,CO₂气云在水平方向的危险区域传播变缓,障碍物的左侧会形成更多区域高浓度的二氧化碳气体,涡流区更明显。

CO₂ 气云越过障碍物后,高度 1m 和高度 1.5m 的障碍物在泄漏时间 60s 内浓度都在 0.1 以下,而高度 0.5m 障碍物在 25s 左右达到 0.1 的浓度,说

明增加障碍物高度可显著降低 CO₂ 浓度,增加人逃生时间。

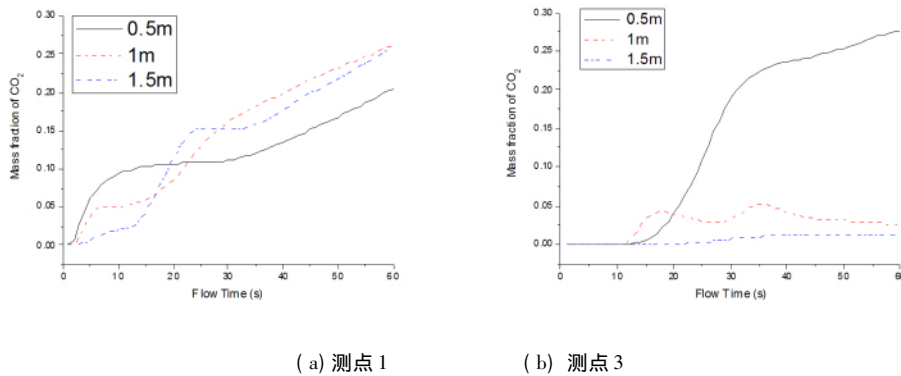


图 7 不同障碍物高度测点 CO₂ 质量分数变化图

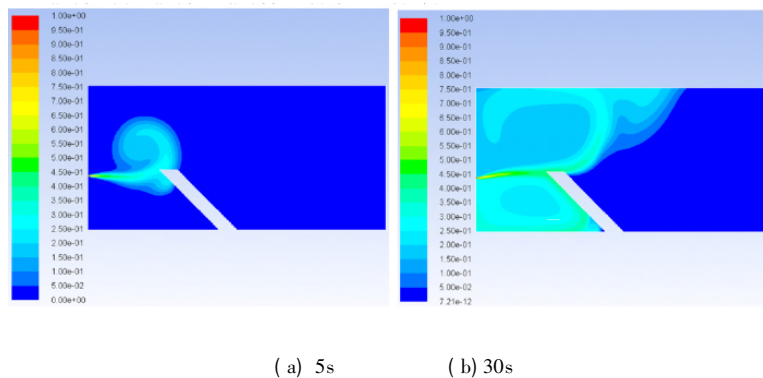


图 8 障碍物向左倾斜 45° 不同时刻 CO₂ 质量分数空间分布图

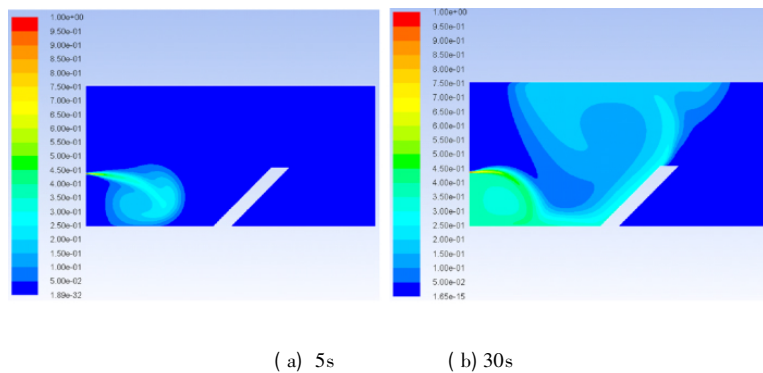


图 9 障碍物向右倾斜 45° 的 CO₂ 质量分数空间分布图

2.4 障碍物倾斜角度

CO₂ 泄漏速度为 3m/s,保持障碍物高度一致,图 8、图 9 分别是障碍物向左倾斜 45° 倾斜和向右倾斜 45° 倾斜质量分数空间分布图。

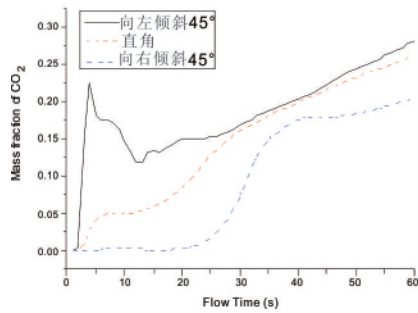
结合图 2、图 7 和图 8 知,向左倾斜 45° 的障碍物左侧形成的高浓度二氧化碳区域最大,障碍物向右倾斜 45° 时二氧化碳扩散的区域最大。从图 10a 曲线图可以看出,障碍物向左倾斜 45° 时,从气体

泄漏开始几乎瞬间就达到了 0.1,障碍物阻碍作用强弱顺序: 向左倾斜 45°、直角和向右倾斜 45°。障碍物向左倾斜 45° 时,CO₂ 气云越过障碍物继续扩散的质量分数上升的最慢,留给人的逃生时间最多,向右倾斜 45° 的障碍物,下风向高浓度 CO₂ 区域最大。

3 结 论

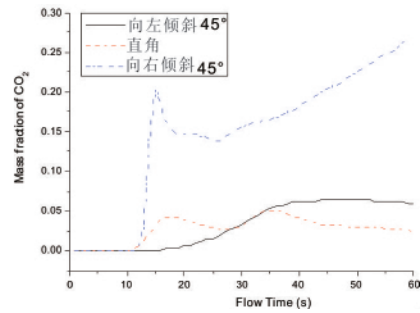
本文基于计算流体力学分析了泄漏速度、障碍物高度和障碍物的倾斜角度对船舱二氧化碳泄露扩散的影响,主要结论如下:

(1) 泄漏速度越大,向船舱底部沉积愈明显,气体扩散的范围越大,回流现象越明显,危险区域越大,留给人的逃生时间越短。



(a) 测点 1

(2) 增加阻碍物的高度可显著增加对二氧化碳泄漏的阻碍作用,显著降低 CO₂ 浓度,增加人逃生时间。



(b) 测点 3

图 10 不同阻碍物倾斜角度时测点 CO₂ 质量分数

(3) 向左倾斜 45° 的阻碍物阻碍效果最佳,回流效果最显著。向右倾斜 45° 的阻碍物,下风向高浓度 CO₂ 区域最大,人逃生越困难。

参考文献:

- [1] 周军,张忠杰,徐祥云. 船舶固定式 CO₂ 灭火系统安全管理及注意事项[J]. 航海, 2019, 000(005): 64-67.
- [2] 冯忠海,黄日生,吴木生,等. 一起货轮船舱急性二氧化碳中毒事故调查分析[J]. 职业卫生与应急救援, 2019, 037(001): 84-85.
- [3] 冯忠海,吴木生,黄日生,等. 2009—2018 年湛江市急性职业性化学中毒事故调查分析[J]. 应用预防医学, 2019(3): 201-203.
- [4] 尹仕伟. 一起船舱内使用 CO₂ 灭火器引起的中毒死亡事件调查[J]. 职业卫生与应急救援, 2011, 029(003): 165-166.
- [5] 顾帅威,李玉星,滕霖,等. 小尺度超临界 CO₂ 管道小孔泄漏减压及降温特性[J]. 化工进展, 2019, 38(02): 805-812.
- [6] 刘恩斌,杨柳婷,孙龙. 超临界 CO₂ 管道泄漏扩散数值模拟[J]. 管道技术与设备, 2016(05): 1-3 9.
- [7] LI Kang, ZHOU Xuejin, TU Ran, et al. An experimental inves-

tigation of supercritical CO₂ accidental release from a pressurized pipeline[J]. Journal of Supercritical Fluids, 2016, 107: 298-306.

- [8] 钱新明,刘彧,刘振翼. 管道输送二氧化碳泄漏模型研究进展及展望[J]. 安全与环境学报, 2013(02): 203-208.
- [9] 陈兵,康庆华,肖红亮. 含杂质 CO₂ 管道输送泄漏扩散的数值模拟[J]. 安全与环境工程, 2019(3): 95-100.
- [10] 岳士凯,杨以湖,王华. 氯气扩散影响因素的数值模拟[J]. 消防科学与技术, 2011, 030(006): 479-481.
- [11] 杨志青,王志国,仲晨华,等. 舰船密闭舱室火灾模拟及防火设计[J]. 舰船科学技术, 2004(04): 57-59.
- [12] 胡园园,王志荣,蒋军成. 自然通风条件下室内 CO₂ 扩散浓度变化的数值模拟[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2012(03): 133-137.
- [13] 杨唐,韩云平,李琳,等. 雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性[J]. 环境科学, 2019, 40(04): 162-169.
- [14] Woolley R, Fairweather M, Wareing C J, et al. An integrated, multi-scale modelling approach for the simulation of multi-phase dispersion from accidental CO₂ pipeline releases in realistic terrain[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2014: 221-238.
- [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(05): 126-129+158.

Simulation Analysis of Carbon Dioxide Leakage in Cabin

LI Xi^{1,2}, SHI Zhengbo³, CHENG Xinglong¹, ZHU Linlin¹, LI Zongqun¹, WANG Chuanhu^{1*}

(1. Engineering Technology Research Center of Silicon-based Materials, Bengbu University, Bengbu Anhui 23303, China; 2. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China; 3. Bengbu Shenzhou Machinery Co., Ltd, Bengbu Anhui 23303, China)

Abstract: In this paper, the leakage and diffusion of carbon dioxide in the cabin is simulated, and the effects of leakage speed, height of obstacles and angle of obstacles on the leakage and diffusion are explored. It is concluded that the higher the CO₂ leakage rate, the more obvious the deposition to the ground of the cabin, and the greater the range of gas diffusion, and then the shorter the escape time is for human. Increasing the height of the obstacle can significantly increase the blocking effect on the cabin CO₂ leakage. The blocking effect inclined by 45° to the left is the best. When obstacles inclined 45° to the right, the downwind direction has the highest concentration of CO₂, which increases the difficulty to escape for people. The simulation results can provide a reference for the prevention of CO₂ leakage accidents in the cabin.

Key words: cabin; carbon dioxide; leakage; obstruction; simulation