

# 自然通风条件下催泪剂室内扩散特性的模拟研究

欧阳的华<sup>1</sup>, 张倩韬<sup>2</sup>, 赵 雁<sup>1</sup>

( 1. 武警工程大学装备工程学院, 陕西 西安, 710086; 2. 陕西国际商贸学院, 陕西 咸阳, 712046 )

**摘 要:** 为评估催泪弹室内的作用效能, 依据粒子的动力学模型, 采用 Fluent 软件对催泪剂的室内扩散特性进行了模拟研究。结果表明, 在自然通风的条件下, 无论是竖直方向还是水平方向上, 越靠近窗口催泪剂的浓度会越低, 但总体而言, 由于不受外界的影响, 催泪剂不易扩散, 浓度基本维持在 0.7~0.9 的范围内。

**关键词:** 催泪剂; 扩散; 效能; 室内

**中图分类号:** TQ567.5      **文献标识码:** A

## Simulation Study on Interior Lachrymator Diffusion under the Condition of Natural Ventilation

OUYANG Di-hua<sup>1</sup>, ZHANG Qian-tao<sup>2</sup>, ZHAO Yan<sup>1</sup>

(1. College of Equipment Engineering, Engineering University of CAPF, Xi'an, 710086; 2. Shaanxi Institute of International Trade & Commerce, Xianyang, 712046)

**Abstract :** In order to evaluation the efficiency of the tear bomb indoor, according to the dynamic model of the particle, the indoor lachrymator diffusion under the condition of natural ventilation was simulated by the Fluent. The results show that the nearer to the window, the lower the relative concentration of lachrymator, whether it is vertical or horizontal direction. While without the influence from outside world, the lachrymator is not easily diffused, the concentration of the lachrymator is adjusted to maintain the range 0.7 to 0.9.

**Key words :** Lachrymator ; Diffusion ; Efficiency ; Indoor

目前, 基于环境改善和污染控制的需要, 国内外学者对空气或其他气体的室内扩散做了大量研究。如 Paramasivam<sup>[1]</sup>研究了在自然通风时, 窗口尺寸对室内环境的影响, 确定了使室内处于热舒适情况下的通风口布置位置和窗口的长宽比。Yassin 等人<sup>[2]</sup>则针对风速分布和大气污染物扩散之间的耦合统计关系, 构建了相关的数学模型。国内, 吴晋湘等<sup>[3]</sup>基于双尺度湍流模型对室内可燃气体泄漏进行了研究, 并推导出了相应的经验公式; 王晓华<sup>[4]</sup>采用数值模拟的方法, 研究了可燃气体室内的扩散特性, 蒋裕平等<sup>[5]</sup>则对甲醛的室内扩散特性进行了模拟研究; 肖楚璠<sup>[6]</sup>研究了在

自然通风条件下, 室内家具所释放的甲醛的扩散特性。

武警部队在处置突发事件以及反恐作战过程中, 根据战时特定情况需要, 经常会向室内或者相对密闭的空间内(如机舱)投放催泪弹, 以实现恐怖分子的刺激作用。其作用效果的好坏则与催泪剂浓度的演变规律密切相关, 而关于防暴催泪剂室内扩散特性研究的文献资料尚未见报道。因此, 开展催泪剂在室内扩散特性的研究具有重要的现实意义。

为此, 本文对催泪剂在室内自然通风条件下的扩散特性进行了研究, 分析了室内不同观测点水平或竖

收稿日期: 2015-04-15

作者简介: 欧阳的华(1983-), 男, 讲师, 主要从事烟火技术研究。

基金项目: 飞行器海上测量与控制联合实验室开放基金(FOM2014OF016); 武警工程大学军事理论研究项目(WJY201510)。

直方向的催泪剂浓度,以期为今后催泪弹作用效能的评估和改进提供理论参考。

## 1 计算模型

### 1.1 数学模型

#### 1.1.1 气相控制方程

假定催泪剂为均匀球体,在不考虑两相间的温度差、相变、颗粒物的形变及颗粒物间的相互作用时,其可视为二维定常不可压缩流动,对应的控制方程为:

(1) 连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g) + \nabla \cdot (\rho_g u_g) = 0 \quad (1)$$

式(1)中:  $u_g$  和  $\rho_g$  分别为气体的速度与密度。

(2) 动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g u_g) + \nabla \cdot (\rho_g u_g u_g) = -\nabla p - S_{p-g} - (\nabla \cdot \tau_g) + \rho_g g \quad (2)$$

$$\tau_g = \mu_g \left[ \nabla u_g + \nabla u_g^T \right] - \frac{2}{3} \mu_g \nabla \cdot u_g I \quad (3)$$

$$\mu_g = \mu_{lam,g} + \mu_t \quad (4)$$

式(2)~(4)中:  $\tau_g$  为气相应力张量;  $\mu_g$  为气相粘度;  $\mu_{lam,g}$  为气相层流动力粘度;  $\mu_t$  为气相湍流动力粘度;  $I$  为单位矢量;  $S_{p-g}$  为两相间的作用力,其表达式为:

$$S_{p-g} = \frac{\sum_{i=1}^N Num \cdot S_i \cdot f_{d,i}}{\sum_{i=1}^N Num \cdot S_i} = \frac{\sum_{i=1}^N S_i \cdot f_{d,i}}{\sum_{i=1}^N S_i} \quad (5)$$

式(5)中:  $N$  为网格中催泪剂的数量;  $Num$  为单个模拟颗粒物所代表的真实催泪剂粒子数;  $S_i$  为催泪剂粒子所在计算网格的球表面积。

#### 1.1.2 运动学方程

计算时只考虑重力、萨夫曼(Saffman)升力和气体曳力的作用,依据牛顿第二定律,催泪剂的运动方程可表示为:

$$m_i \frac{du_i}{dt} = m_i g + F_S + F_D \quad (6)$$

式(6)中:  $m_i$ ,  $u_i$  分别表示催泪剂的质量和速度;

$g$  为重力加速度;  $F_S$  为萨夫曼升力;  $F_D$  为气体曳力。其中:

$$m_i = \rho_i V_i \quad (7)$$

$$F_S = 1.6 \times (\mu \cdot \rho_g)^{\frac{1}{2}} d_i^2 \left| v_g - v_i \right| \left| \frac{\partial v_g}{\partial y} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$F_D = 3\pi \cdot \mu \cdot u_i \cdot d_i \quad (9)$$

式(7)~(9)中:  $\rho_i$ ,  $V_i$ ,  $d_i$  分别为催泪剂的密度、体积和粒径;  $\mu$ ,  $\rho_g$  分别为空气的粘度系数和密度。

### 1.2 室内物理模型

首先构建房间的几何模型,如图1所示,房间长为5m( $x$ 轴方向),宽为4m( $z$ 轴方向),高为3m( $y$ 轴方向)。房间左侧有一个门,右侧有一个可以开启的  $1.6 \times 1.6 \text{ m}^2$  窗户。催泪弹的释放位置为点  $s$  ( $x=1.55 \text{ m}$ ,  $z=2.0 \text{ m}$ )。为了较好地观测不同位置的催泪剂浓度,计算时在垂直方向上选取了  $N1 \sim N6$  共6个观测点,其对应的坐标位置分别为:  $N1$  ( $x=0.6 \text{ m}$ ,  $z=0.6 \text{ m}$ ),  $N2$  ( $x=0.6 \text{ m}$ ,  $z=2.0 \text{ m}$ ),  $N3$  ( $x=0.6 \text{ m}$ ,  $z=3.4 \text{ m}$ ),  $N4$  ( $x=2.5 \text{ m}$ ,  $z=0.6 \text{ m}$ ),  $N5$  ( $x=2.5 \text{ m}$ ,  $z=2.0 \text{ m}$ ),  $N6$  ( $x=2.5 \text{ m}$ ,  $z=3.4 \text{ m}$ ); 在水平方向上选取了  $N10 \sim N12$  共3个观测点,其对应的坐标位置分别为:  $N10$  ( $z=0.6 \text{ m}$ ,  $y=1.1 \text{ m}$ ),  $N11$  ( $z=2.0 \text{ m}$ ,  $y=1.1 \text{ m}$ ),  $N12$  ( $z=3.4 \text{ m}$ ,  $y=1.1 \text{ m}$ )。

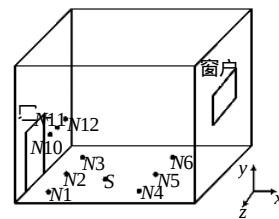


图1 室内模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the interior model

室内的温度设定为常温(25℃),由于恐怖分子在室内时,门往往是紧闭的,所以可以不考虑室内通风,初始气流为静止流场,窗口为唯一的出口条件。催泪剂释放时的出口速度  $u_{i,0}=10 \text{ m/s}$ ,催泪剂的直径为  $10 \mu \text{ m}$ ,密度为  $1.3 \text{ g/cm}^3$ 。考虑到室内弹体释放源为单个弹体释放源,体积浓度计算起来相对较小,误差将增大,因此采用归一法的方法,将释放源处的催

泪剂浓度设为 1, 其余位置浓度是相对释放源处的浓度大小。

### 1.3 物理及网格模型

如图 2(a) 所示, 先利用 CFD 前处理软件 (Gambit) 建立其三维模型, 而后再采用结构化网格进行体网格划分, 如图 2(b)。根据文献[7], 网格特征尺寸 ( $s$ ) 应满足:

$$\frac{1}{3}\lambda \leq \Delta s \leq \frac{1}{2}\lambda \quad (10)$$

式 (10) 中  $\lambda$  为粒子间的平均自由程, 其值在计算前通过估算获得。

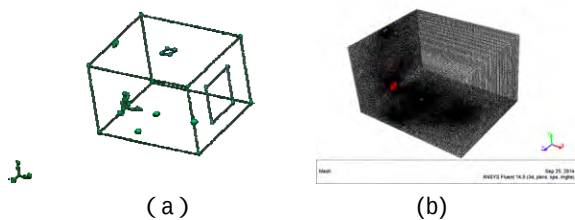


图 2 室内的物理模型与网格模型

Fig.2 Physical and mesh model of the interior

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 流场及浓度分布

本文采用 FLUENT 软件来求解各控制方程, 通过有限体积法对各控制方程进行离散, 压力与速度耦合采用 SIMPLE 算法, 差分格式采用二阶迎风格式, 以求得合理的控制方程的解。

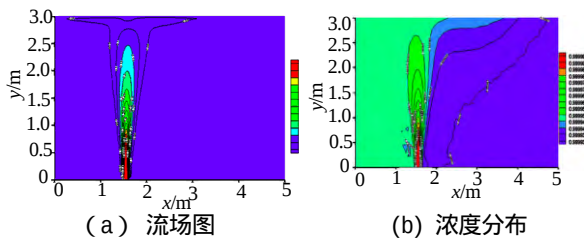


图 3 催泪剂的流场图及浓度分布 ( $z=0$ )

Fig.3 The flow field of the lachrymator and concentration distribution (at  $z=0$ )

图 3(a) 是在  $z=0$  的对称中心截面上的流场图, 由图 3(a) 可知, 由于室内流场的流速较低, 所以基本上形成了以弹体释放源  $S$  处为中心, 向两侧逐渐扩散的流场分布。这主要是因为对于本流场而言, 外界流场的作用十分微弱, 催泪剂主要是依赖自身的释放速度以及它们所受的重力、气体曳力以及随机力等各种作用力所驱动的, 因此其不易扩散开来。图 3(b)

为对应的催泪剂浓度分布, 图中通过颜色来表示催泪剂浓度的高低, 颜色越接近蓝色代表催泪剂的浓度越低, 反之, 颜色越接近红色则表示催泪剂的浓度越高。由该图可知, 由于形成的催泪剂不易扩散, 因此其浓度较高, 基本在 0.7~0.9 的范围内。

### 2.2 不同位置处的催泪剂浓度分布

图 4 为不同高度处  $y$  方向的催泪剂浓度分布, 图 4(a) 为  $x=0.6\text{m}$  处, 不同高度处  $y$  方向的催泪剂浓度分布; 图 4(b) 为  $x=2.5\text{m}$  处, 不同高度处  $y$  方向的催泪剂浓度分布。

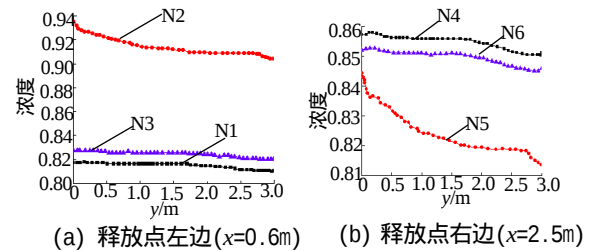


图 4 不同高度处  $y$  方向的催泪剂浓度分布

Fig.4 The lachrymator concentration distribution at  $y$  direction with different height

由图 4 可知, 不同高度处  $y$  方向的催泪剂存在一定的浓度梯度。同时还可发现,  $N2$  和  $N5$  虽然都正对窗口, 但是由于  $N5$  在释放点的右边, 比较靠近窗口所在的截面, 所以催泪剂较容易被窗口吸引而向外扩散, 浓度相对其他位置来说明显较小。而  $N2$  虽然也正对窗口, 但其位于释放点的左边正上方, 且离窗口较远, 故浓度较大。

图 5 为在高度  $y=1.1\text{m}$  处, 不同前后处  $x$  方向的催泪剂浓度分布。

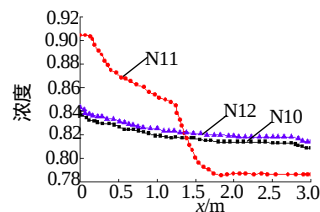


图 5  $x$  方向不同观测点处的颗粒浓度分布

Fig.5 The concentration distribution at  $x$  direction with different observation point

由图 5 可见, 在最前点和最后点的浓度变化不大, 而在中间点处, 呈现一种先增大, 之后又不断减小的趋势。这主要是因为  $N11$  处的  $x$  方向浓度会先经过释放源位置, 后又靠近窗口, 故呈现出先增大后减小的趋势, 而  $N10$ 、 $N12$  水平方向, 由于受气流影响较弱, 故浓度较高, 之后距离窗口处越来越远, 故浓度也在

逐步地减少,这一点与 Fick 扩散定律<sup>[9]</sup>:“粒子将由浓度高的地方向着浓度较低的地方不断迁移,使粒子浓度梯度逐步减小”是一致的。

但是,总体而言,由于催泪剂一直是处于室内,不受外界的其他影响,其主要是在重力、气体曳力及随机力等的作用下,进行随机扩散运动,因此各点位置的浓度均比较高,基本维持在 0.7~0.9 的范围内。

### 3 结论

本文采用 Fluent 软件对催泪剂扩散动力学特性进行了数值模拟,经计算分析得到以下结论:

(1) 在自由扩散的情况下,室内形成了以弹体释放位置为中心,向两侧扩散的气流场和粒子浓度场,由于没有外界的影响,整个室内的浓度分布普遍较高,不易扩散。

(2) 通过比较不同位置的催泪剂浓度,发现无论是竖直方向还是水平方向上,离通风窗口越近的位置,浓度越低。

(3) 本研究为催泪剂的扩散特性研究提供了一种新的思路,但作为尝试,计算中未考虑催泪剂自身的影响,如催泪剂粒子之间的碰撞与凝并等效应,其

还有待于进一步改进。

#### 参考文献:

- [1] Paramasivam Ravikumar, D. Prakash. Analysis of thermal comfort in an office room by varying the dimensions of the windows on adjacent walls using CFD: a case study based on numerical simulation[J]. Building Simulation, 2009, 2(3): 28-35.
- [2] Yassin Mohamed F. Filtering effect of wind flow turbulence on atmospheric pollutant dispersion[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 184 (6): 3 749-3 760.
- [3] 吴晋湘,贾云飞,周波,等.室内可燃气体泄漏扩散的数值模拟[J].安全与环保, 2007, 31 (10): 42-44.
- [4] 王晓华.室内燃气泄漏扩散模拟分析[J].科学技术与工程, 2012, 12 (32): 8 785-8 787.
- [5] 蒋裕平,倪伟帆,方永腾.甲醛室内扩散的模拟分析[J].绿色科技, 2014 (3): 89-90.
- [6] 肖楚璠.自然通风条件下室内甲醛扩散模拟研究[J].洁净与空调技术, 2013 (1): 15-18.
- [7] Bird G. A. Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows[M]. Oxford: Clarendon Press, 1994.
- [8] 卢正永.气溶胶科学引论[M].北京:原子能出版社, 1999.