

液体气溶胶粒子间相互作用的仿真研究

胡 卉¹, 崔 洋², 徐 震², 关 甜², 马骊溟²

(1. 长安大学运输工程学院, 西安 710000; 2. 长安大学汽车学院, 西安 710000)

摘 要: 针对气溶胶在大规模场地试验会耗费大量的人力物力成本的问题, 同时气溶胶本身具有的有害影响不可控, 为了提高试验的效率和保证试验的安全可靠性, 本文采用 CFD 软件对气溶胶形成及扩散过程进行计算机仿真研究. 本文首先对气溶胶混合气形成的过程进行数值模拟研究, 搭建物理和数学模型模拟液态气溶胶生成过程, 通过加入气溶胶注入器数目模拟多个气溶胶来源之间的相互影响; 再将气溶胶连续注射到立方体模型中, 分散气溶胶的浓度被允许自然衰减一段时间. 结果如下: 当液态气溶胶进入到环境中时, 随着时间的推移液态气溶胶在环境中扩散, 并且在中下部聚集; 当环境压强增加时, 扩散速率会有减少. 分析仿真结果得出, 液态气溶胶模型可以作为一种有效的工具, 用于合理分析液态气溶胶扩散所造成的影响.

关键词: 气溶胶; 数值模拟; 仿真建模; CFD 软件

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2022.034002

Simulation study of interaction between liquid aerosol particles

HU Hui¹, CUI Yang², XU Zhen², GUAN Tian², MA Li-Ming²

(1. College of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710000, China;

2. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710000, China)

Abstract: Aiming at the problem that large-scale field test of aerosol will cost a lot of manpower and material resources, and the harmful effects of aerosol itself are uncontrollable, in order to improve the efficiency of the test and ensure the safety and reliability of the test, in this paper CFD software is used to control the formation of aerosols and the safety and reliability of the test. The diffusion process is studied by computer simulation. Firstly, we conduct numerical simulation research on the formation process of aerosol mixture, builds physical and mathematical models to simulate the formation process of liquid aerosol, and simulate the interaction among multiple aerosol sources by adding the number of aerosol injectors. The aerosol is then continuously injected into the cuboid model, and the concentration of the dispersed aerosol is allowed to decay naturally for a period of time. The results show that when the liquid aerosol enters the environment, it diffuses in the environment and accumulates in the middle and lower parts; when the ambient pressure increases, the diffusion rate will decrease. The analysis and simulation results show that the liquid aerosol model can be used as an effective tool to reasonably analyze the effect of liquid aerosol diffusion.

Keywords: Aerosol; Numerical simulation; Simulation modeling; CFD software

收稿日期: 2021-12-31

基金项目: 国家重点研发计划-中国和美国政府合作项目(2019YFE0117800)

作者简介: 胡卉(1979—), 女, 教授, 博士, 研究方向为优化与仿真技术.

通讯作者: 崔洋. E-mail: 2020122013@chd.edu.cn

1 引言

在日常活动中,空气中可以较长时间飘浮着具有危害的气溶胶散射粉尘小粒子。而气溶胶分散体系是由分散介质和分散相构成的。其中以空气为主要分散介质,由固体或者液体的小粒子组成了分散相,在空气中漂浮的固体和液体小粒子则构成了相对固定的扩散体系^[1]。随着中国经济的高速发展,特别是经济发展迅猛的长三角、珠三角出现了区域性大气颗粒物污染现象,气溶胶污染日益成为大气污染控制的难点和痛点。另外存在于空气中的气溶胶除了自身的污染危险,粉末形式的环境金属物质存在很大的意外扩散可能性,导致吸入或皮肤接触^[2-4]。吸入被认为是最有可能和最直接的接触环境金属物质的途径^[5],但是皮肤渗透或摄入也可能无意中发生,还能传播真菌和病毒,导致地区性疾病的流行和爆发^[6]。因此需要对气溶胶形成及扩散过程进行研究,为后续气溶胶的净化提供数据依据^[7]。

目前对气溶胶形成以及扩散的研究大都采用试验方法。刘俊等^[8]探讨了气溶胶浓度变化过程对雷暴云微物理过程、起电以及空间电荷结构所产生的影响,结合了某次山地雷暴案例,通过在传统的二元雷暴云起和放电模型中,加入云滴冻结因子的试验进一步验证了该理论。韩雪^[9]在一个密闭的空间内均匀地注入气溶胶粒子和空气,通过溜凝作用,注入粒子的直径将伴随着时间呈现一定的函数规律,用这种结构近似模拟大气气溶胶在风作用下的演变过程。文献^[10]利用自主研发的大型室外光化学烟雾箱模拟系统,在接近真实大气环境条件下,开展烟雾箱实验,设计并制定科学具体的大气光化学烟雾箱模拟实验方案。石茹琳等^[11]在 WRF-SBM 模型中模拟了一次新疆夏季的冰雹天气过程,通过气溶胶浓度对比,对冰雹云的微物理特征、冰雹形成机理和降水过程的影响采用敏感性试验研究。邓康清等^[12]则利用内部流场-热力耦合的三维有限元流体 FLUENT 计算软件系统和暂态热分析软件系统,分析了某种烟火型气溶胶发生器燃气流场情况,从而得到了气溶胶散射的外表面温度场分布,及其随燃料流量、发生器位置、气溶胶散射燃烧温度、工作持续时间等的改变,以及气溶胶散射的运动规律。任浩亮等^[13]采用离散相模型模拟气溶胶颗粒在烟幕流场下的扩散规律。张国强^[14]在探索柴油-空气燃料爆轰燃烧的超

细雾化的基础上,进一步研究在旋转连续爆轰燃烧室内柴油空气混合气溶胶运动规律,找到运动机理获取最佳雾化模型。

气溶胶越来越广泛地应用在国防、消防、农业、医学等领域,这就需要企业和科学家们不断利用其开发创新,来改善人们生活中的各个方面^[15-17]。其危害的一方面也更需要得到全社会的重视^[18-20]。然而,在大规模场地进行试验会耗费大量的人力物力成本,并且气溶胶的有害影响存在不可控性^[21,22]。为了提高试验的效率和保证试验的安全性,本文采用大型计算流体力学仿真软件 STAR-CD 进行研究。首先,我们基于流体的物理和数学模型对液态气溶胶进行数值模拟;然后采用有限容积法模拟气溶胶在仿真环境中的扩散规律,获得气溶胶粒子在仿真环境中的浓度分布图;最后通过改变气溶胶来源数目和环境压强来对扩散规律进行研究。

2 液体气溶胶喷射数学模型及基本控制方程

流动的流体也要遵守基本的物理规律,通过不同的控制方程进行控制这些流体,从而能够描述流体流动的物理规律。即:质量守恒方程,理想气体状态方程,动量守恒方程。如果其中还有流动流体内部的不同成分之间的相互作用,还需要组分守恒方程。

(1) 质量守恒方程

可压缩流体的笛卡尔坐标系张量形式的质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = s_m \quad (1)$$

公式中 t 为时间; ρ 为密度; x_i 为笛卡尔坐标 ($i=1, 2, 3$); u_j 为流体在 x_i 方向上的绝对速度分量; s_m 为质量原项。

(2) 动量守恒方程

流体动量守恒方程式为:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - s_i \quad (2)$$

式中 p 表示压力; τ 表示应力张量分量; s_i 表示动量原项分量。

(3) 组分质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \text{div}(\rho_m \vec{u}) = \text{div}[\rho D \text{grad}(Y_m)] + \dot{\rho}_m^c + \dot{\rho}_m^s \quad (3)$$

式中, ρ_m 表示组分 m 的密度; $\vec{u}$ 为流体速度; D 为扩散系数. 根据菲克定律, $D=\mu/(\rho S_c)$, μ 为流体的动力黏性系数, S_c 为 Schmidt 数; $\text{grad}()=\partial()/\partial x+\partial()/\partial y+\partial()/\partial z$; Y_m 为组分 m 的质量分数; $\dot{\rho}_m^c$ 、 $\dot{\rho}^s$ 分别是化学反应和喷雾产生的源项; δ_{ml} 是克罗内克函数(Kronecker Delta, $m=1, \delta_{ml}=1; m\neq 1, \delta_{ml}=0$). 组分质量守恒方程常简称为组分方程.

(4) 控制方程统一形式

从以上各式可以看出, 尽管(1)(2)(3)中的具体变量不一样, 但是它们反应的物理量守恒形式完全相同. 如果用 φ 代表它们通用的变量, 则以上控制方程可以统一表示为:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t}+\text{div}(\rho\vec{u}\varphi)=\text{div}(\Gamma\text{grad}\varphi)+S \tag{4}$$

式中, φ 可以代表求解变量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项.

不过由于实际情况比较复杂, 几乎都是湍流过程, 因此需要更加精确的湍流模型.

3 仿真模型的建立

3.1 CFD 解决问题基本步骤

用 CFD 解决问题需要建立模型, 我们需要分别从几何材料、材料、求解控制、网格、边界条件及其他数值因素方面入手, 确定研究物体的大小、形状和零部件相对位置等几何要求, 明确研究对象的粘度、密度和沸点等物理参数, 选择合适的物理模型以及正确的算法程序.

目前, 大多数 CFD 软件解决问题基本工作流程如图 1 所示.

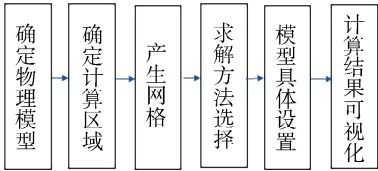


图 1 CFD 解决问题基本工作流程
Fig. 1 Basic work flow of CFD problem solving

3.2 离散方程的建立

STAR-CD 的建立基础是有限容积法, 而其方法核心是离散方式在区域上的建立. 这个方法的实质就是以有限的点来代替之前区域中的无限个点, 也就是将区域用网格进行划分, 即: 计算网格. 目前的 STAR-CD 可以形成多种形状的多面体网格, 四面体、六面体甚至不规则的多面体.

就二维问题而言, 有限容积法的经典网格如

图 2 所示. P 为网格上随意选定的一个点, E 、 W 、 S 、 N 分别是 east、west、south、north 的首字母缩写, 分别代表 P 点东、西、南、北四个方向的相邻节点的标记. e 、 w 、 s 、 n 则是指东、西、南、北四个区域的标记. 由此形成的二维定常坐标系中, 二维有限差分方程的一般形式为:

$$\alpha_P\varphi_P=\alpha_E\varphi_E+\alpha_W\varphi_W+\alpha_S\varphi_S+\alpha_N\varphi_N+S_C \tag{5}$$

在三维非定常坐标系中, 三维有限差分方程的典型形式为:

$$\alpha_P\varphi_P=\alpha_P^0\varphi_P^0+\alpha_E\varphi_E+\alpha_W\varphi_W+\alpha_S\varphi_S+\alpha_N\varphi_N+\alpha_H\varphi_H+\alpha_L\varphi_L+S_C \tag{6}$$

其简写形式为:

$$\alpha_P\varphi_P=\sum\alpha_I\varphi_I+S_C \tag{7}$$

表达式中 α 为差分方程的系数; S_C 为常数项; 上标 0 表示的是所选点 P 的前一状态; H 和 L 分别表示第三维空间坐标上与 P 点相邻的两个网格点; I 则表示与 P 点相邻的时间和空间的各个网点.

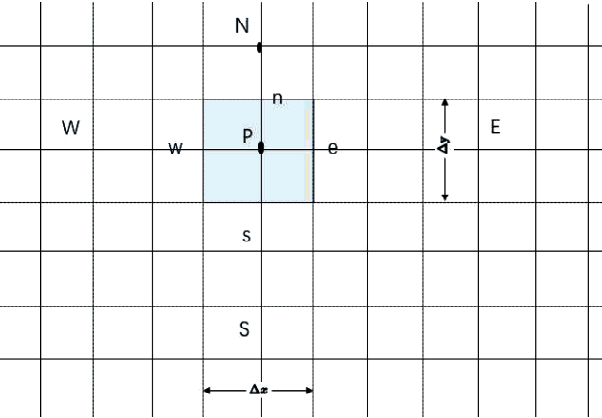


图 2 二维差分问题的计算网格与控制体积
Fig. 2 The computational grid and control volume of the two-dimensional difference problem

3.3 离散方程求解方法

目前 STAR-CD 中常用三种不同的算法, 即 SIMPLE、PISO 和 SIMPISO 算法. 由于本次仿真是一种非定常流动情况, 故需要采用 PISO 算法.

PISO(Pressure Implicit Solution by Split Operator)算法是一种用分裂算子求解压力的隐式算法. 这个算法主要适用于非定常流动, 它有着很多优点, 比如: 针对压力场来说, 它的校准精度较高.

PISO 算法的一般求解步骤:

- (1) 估计压力场 p , 并估计一个迭代初始速度场;
- (2) 求解动量方程, 得到速度场 u, v, w ;
- (3) 求解 $p1'$ 方程, 得到 $p1'$; 用 $p1'$ 来校正速

度值;

(4) 求解 $p2'$ 方程,得到 $p2'$;用 $p1'$ 和 $p2'$ 来校正压力,即 $p=p+p1'+p2'$;

(5) 求解那些通过源项、流体物性等影响流场的其他变量(如温度、浓度等)的离散化方程;

(6) 通过将新求得的速度代入方程得到新的压力值,再以新的压力值代入(2)中直至收敛;

(7) 得到收敛的最后的值,再依次求出其他的值.

3.4 物理模型

3.4.1 喷孔流动模型 本试验用图 3 所示的喷射分裂及雾化模型对柴油进行喷射以及雾化处理,以此近似代替液态气溶胶的生成过程.

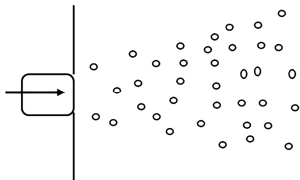


图 3 喷射分裂及雾化模型
Fig. 3 Jet splitting and atomization model

本次试验的喷孔模型所采用的喷射规律如图 4 所示,其质量流量 m 是不变的.

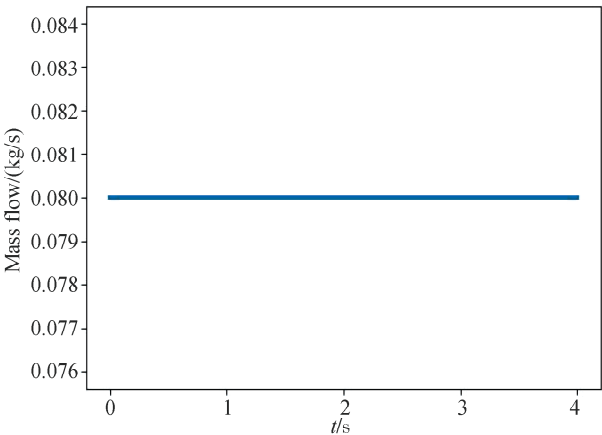


图 4 喷孔喷射规律
Fig. 4 Nozzle jet pattern

质量流量 m :

$$m=\rho\times\frac{\pi d^2}{4}\times v$$

(8)

式中, $\rho=708.25\text{ kg/m}^3$ 为所选液体 C12H26 的密度; d 为喷射直径,本研究中 $d=0.2\text{ mm}$; v 为质量流率.

质量流率 v 计算方法:

$$v=C_d\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}=C_d\sqrt{\frac{2(p_{inj}-p_{absolute})}{\rho}}$$

(9)

其中, $C_d=0.6$ 为阻力系数; $p_{absolute}$ 为绝对压力; p_{inj} 为喷射压力.

$$p_{absolute}=p_G+p_0$$

(10)

式中, p_G 为相对压力; $p_0=1.013\ 25\times10^5\text{ Pa}$ 为标准大气压.

仿真室内,根据其流动特点,选择拉格朗日多项流.

3.4.2 液滴雾化模型 本文采用的液滴雾化模型为 Huh 雾化模型.该模型的简单描述可以分为以下两个方面.

- (1) 喷孔处产生的湍流在缸内形成扰动;
- (2) 扰动持续增长,当达到一定程度,压力将会成指数成长.

喷孔出口处的平均湍动能:

$$k_a=\frac{U^2}{8L/D}\left(\frac{1}{C_d^2}-K_c-1\right)$$

(11)

喷孔出口处的湍流耗散率:

$$\epsilon_a=\frac{K_\epsilon U^3}{2L}\left(\frac{1}{C_d^2}-K_c-1\right)$$

(12)

喷射液滴初始初始湍流长度及时间长度:

$$L_t^0=C_\mu^{3/4}\frac{k_a^{3/2}}{\epsilon_a}$$

(13)

$$\tau_t^0=C_\mu^{3/4}\frac{k_a}{\epsilon_a}$$

(14)

t 时刻湍流长度及时间长度随时间衰减关系:

$$L_t(t)=L_t^0\left(1+C_{a1}\frac{t}{\tau_t^0}\right)^{C_{a2}}$$

(15)

$$\tau_t(t)=\tau_t^0\left(1+C_{a1}\frac{t}{\tau_t^0}\right)$$

(16)

式中, U 表示喷射的平均速度; L 表示喷孔的长度; K_c 表示形成损失系数; K_ϵ 是经验系数; C_μ 为 Huh 模型系数.结果见表 1.

表 1 Huh 雾化模型的系数								
Tab. 1 Coefficient of atomization model								
C_μ	K_c	K_ϵ	C_{a1}	C_{a2}	C_1	C_2	C_3	C_4
0.09	0.45	0.5	0.92	0.4565	2.0	0.5	1.0	1.5

3.4.3 液滴撞壁模型 本文选择的是 Bai 碰壁模型^[23],这个模型主要是依据液滴所受的惯性力与表面张力之比的 We 数来决定的.

按照撞壁条件的不同共分为以下七种不同的撞壁类型^[24].

- (1) 粘附(Stick)撞壁液滴以球状粘附在壁面上,通常发生于低速能量较低的情况;
- (2) 蔓延(Spread)撞壁液滴中速情况,大面积

粘合现象。

- (3) 反弹(Rebound)液滴撞壁反弹回来;
- (4) 反弹破碎(Rebound with breakup) 当 $T_w \leq T_{PR}$ 时,液滴不仅会从壁面上反弹回来并且会破碎;
- (5) 蒸发破碎(Boiling-induced breakup) 当 $T_w \approx T_N$,液滴由于高温沸腾而破碎;
- (6) 破碎(Breakup)当 $T_w > T_{PA}$,液滴先是壁面形成油膜,然后油膜分散,形成不同的油膜区域;
- (7) 飞溅(Splash)不规则的反弹破碎。

4 仿真室内环境建立

4.1 固定环境设计

4.1.1 基本模型及模型参数 本文采用以 STAR-CD 建立立方体对液态气溶胶在固定环境中传播进行模拟研究. 通过建立立方体模型来模拟真实环境,本仿真模拟的是封闭环境内的传播。

如图 5 所示,本次研究所采用的模拟环境参数为 40 mm×30 mm×120 mm 的长方体. 计算区域 x, y, z 方向网格数分别为 40, 100, 120.

4.1.2 计算参数设定 由于本文情况属于非定常流动,所以我们采用 PISO 算法. 计算松弛因子设定如表 2 所示.

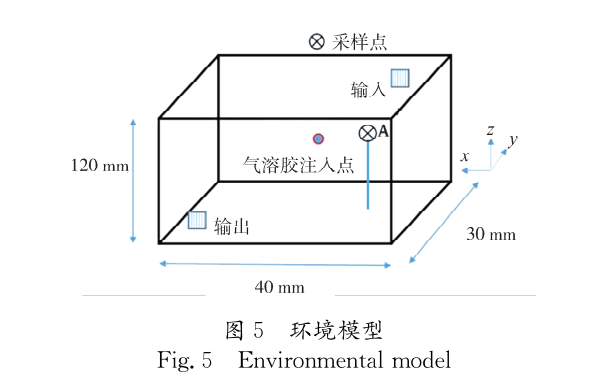


图 5 环境模型
Fig. 5 Environmental model

表 2 计算松弛因子调整			
Tab. 2 Calculate relaxation factor adjustment			
动量松弛因子	压力松弛因子	湍流松弛因子	温度松弛因子
0.5	0.15	0.3	0.3

4.2 操作界面展示

操作界面如图 6 所示. 其中图 6a 开始界面可以选择参数设计,用于模型搭建以及参数选择;图 6b 为数据输出窗口,用于仿真数据输出;图 6c 为主窗口,为可视化区域,用于仿真结果的显示。

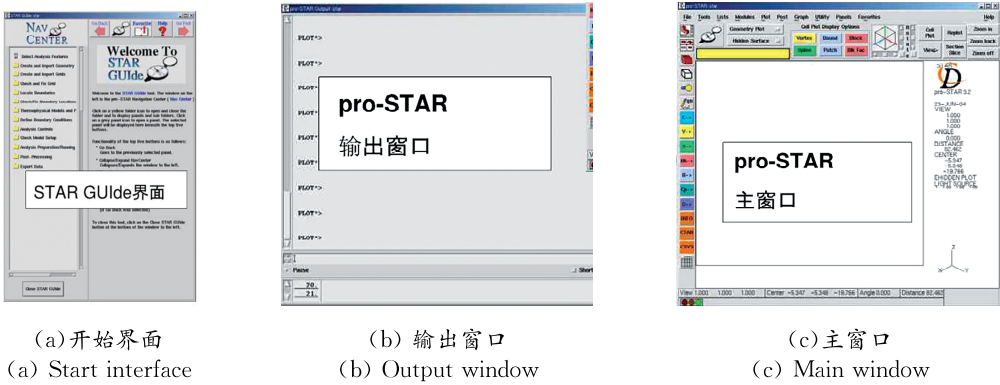


图 6 仿真界面
Fig. 6 Simulation interface

4.3 仿真结果

图 7 以及图 9~图 12 为本仿真试验中的环境浓度场所示图. 图中的喷孔直径均为 0.2 mm. 图中的颜色代表环境的浓度,其中蓝色代表环境浓度为浓度最低,红色部分表示浓度最高. 图 7a、7b、7c 和 7d 分别为当气溶胶模拟进入环境(0.4 MPa)中 0.2、0.4、0.6 和 2 ms 时液体气溶胶的扩散图. 从图 7 可以得出,随着时间的推移,环境中的液体气溶胶会随着时间的增加导致气溶胶扩散,并且会随着时间的流逝大部分聚集在中下部分. 由图 8 可

以看出单个来源液体气溶胶扩散直径随时间的变化,随着时间的增加扩散直径增加,并且在前 1 ms 内,扩散速度很快,随后速度逐渐减慢。

图 9 为多个液体气溶胶来源进入环境中时,液体气溶胶随着时间变化的传播过程图. 图 9a、9b 为两个来源(来源 1 和来源 2)开始 1 和 2 ms 的仿真效果. 图 9c、9d 为三个来源(来源 1、来源 2 和来源 3)开始 1 和 2 ms 的仿真效果. 我们可以看出,在 1 ms 内,液态气溶胶的扩散速度很快;随着时间的推移,当多个来源的液体气溶胶汇聚在一起

时,整体对外的扩散速度减小,不同来源的液体气溶胶在汇聚的同时共同向下部扩散,并且当液体气溶胶相互作用时,扩散速度减缓。

图 10 为改变环境压强(高压 4 MPa)情况下得到的单个液体气溶胶来源的仿真实验情况。图 10a、10b、10c 和 10d 分别为 0.2、0.6、1.4 和 2 ms 时液体气溶胶的扩散图。和图 7 进行对比,我们可以看出,当改变环境压强时,液态气溶胶在空气中的扩散速率变小。

图 11 为两个来源(来源 1 和来源 2)模型在变换环境压强(高压 4 MPa)情况下的仿真实验情况。

当改变环境压强时,液态气溶胶在空气中的扩散速率变小。从图 11 可以看出,进行到 2 ms 时的扩散范围和低压(0.4 MPa)时的扩散范围一致。但是随着时间的推移,扩散趋势仍然不变。图 12 是三个来源的仿真情况,可以看出和图 11 具有相同的物理规律。

本节通过搭建仿真模型,模拟液态气溶胶,以长方体模型模拟气溶胶在固定环境中的扩散,对气溶胶在真实环境中传播进行模拟,分析真实环境中气溶胶粒子间的相互作用。

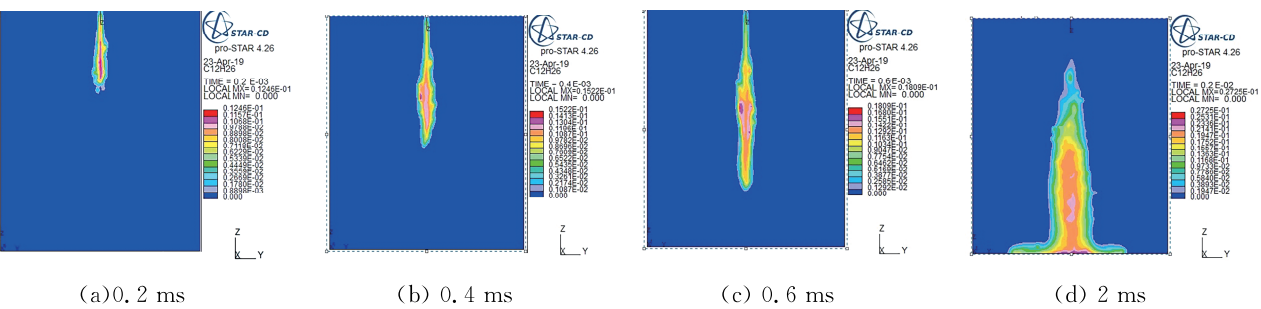


图 7 单个来源模型浓度场
Fig. 7 Single source model concentration field

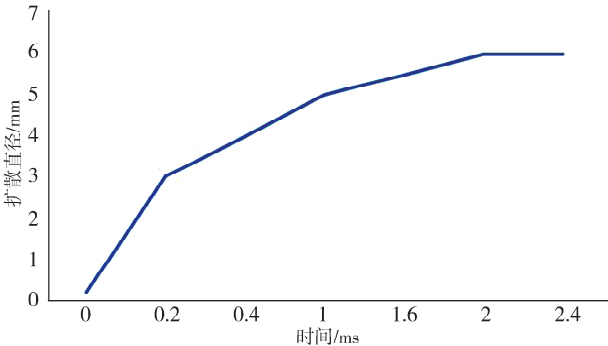


图 8 单个来源液体气溶胶扩散直径和时间关系图
Fig. 8 The relationship between the diffusion diameter and time of a single source liquid aerosol

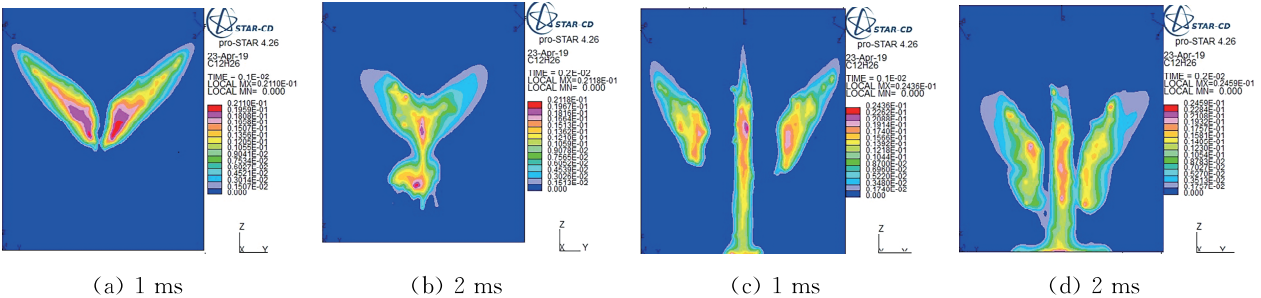


图 9 多个来源模型浓度场
Fig. 9 Multi-source model concentration field

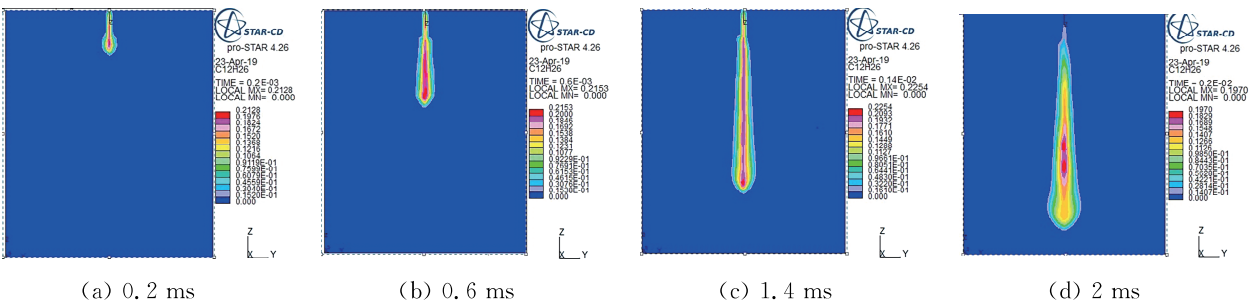


图 10 单个来源低温下浓度场
Fig. 10 Single source concentration field at low temperature

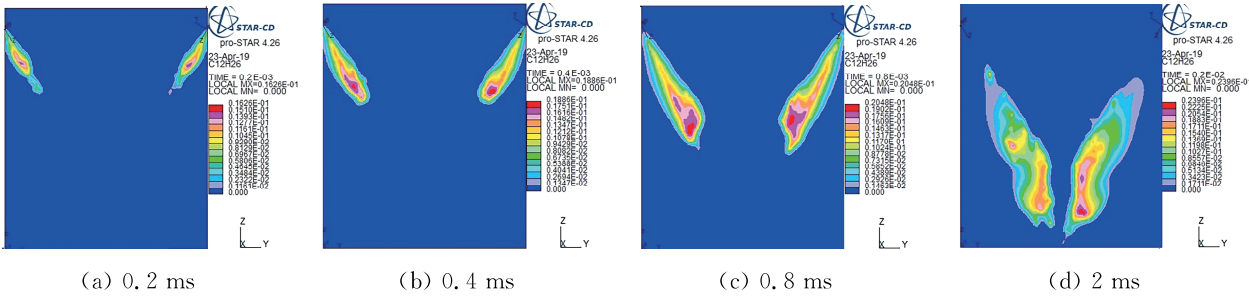


图 11 两个来源模型浓度场
Fig. 11 Two-source model concentration field

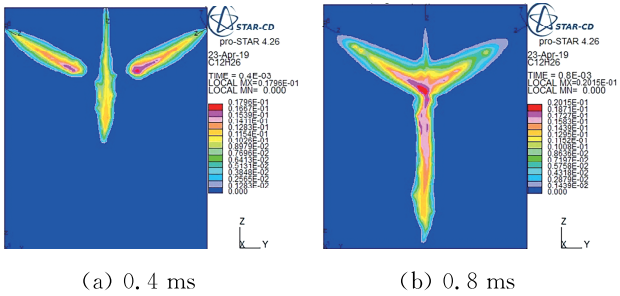


图 12 多个来源浓度场
Fig. 12 Concentration field from multiple sources

5 结 论

本文利用 CFD 软件 STAR-CD 对液态气溶胶形成的过程进行数值模拟研究,模拟液态气溶胶的扩散过程. 液态气溶胶连续注射到立方体模型中,持续释放固定的一段时间. 注射后,分散气溶胶的浓度被允许自然衰减一段时间. 我们得出以下结论:随着时间的推移,液态气溶胶在环境中扩散,并且在中下部聚集;当环境压强增加时,扩散速率减少;当有多个来源时,单个来源分开来看,扩散规律不变,但是当汇聚一起时,由于液态气溶胶之间的相互作用,整体扩散速率有所减少.

参考文献:

[1] 张慧艳. 气溶胶压制剂的制备及其性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2016.

[2] Agus E L, Young D T, Lingard J J, *et al.* Factors influencing particle number concentrations, size distributions and modal parameters at a roof-level and roadside site in Leicester, UK [J]. *Sci Total Environ*, 2007, 386: 65.

[3] Asbach C, Kaminski H, Lamboy Y, *et al.* Silicone sampling tubes can cause drastic artifacts in measurements with aerosol instrumentation based on unipolar diffusion charging [J]. *Aerosol Sci Tech*, 2016, 50: 1375.

[4] Brouwer D H, Spaan S, Roff M, *et al.* Occupational dermal exposure to nanoparticles and nanoenabled products: Part 2, exploration of exposure processes and methods of assessment [J]. *Int J Hyg Envir Heal*, 2016, 219: 503.

[5] 张军科, 罗彬, 张巍, 等. 成都市夏冬季大气胺颗粒物的单颗粒质谱研究[J]. *中国环境科学*, 2019,

- 39: 3152.
- [6] Zhu X, Chang Y, Chen Y. Toxicity and bioaccumulation of TiO_2 nanoparticle aggregates in *Daphnia magna* [J]. Chemosphere, 2010, 78: 209.
- [7] 许慧君, 李超颖, 吴启寅, 等. 气溶胶的研究及其综述[C]//中国环境科学学会 2021 年科学技术年会论文集. 北京:《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司, 2021.
- [8] 刘俊, 谭涌波, 师正, 等. 气溶胶对雷暴云微物理过程和起电影响的数值模拟[J]. 气候与环境研究, 2018, 23: 758.
- [9] 韩雪. 风对气溶胶粒子粒径演化过程影响的数值模拟[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [10] 赵露. 异戊二烯生成二次有机气溶胶过程的室外烟雾箱模拟研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [11] 石茹琳, 银燕, 陈倩, 等. 气溶胶对新疆冰雹形成物理过程影响的数值模拟研究[J]. 大气科学, 2021, 45: 107.
- [12] 邓康清, 李颖, 鲁锐华, 等. 烟火型气溶胶发生器温度场仿真分析[J]. 消防科学与技术, 2019 (7): 987.
- [13] 任浩亮, 张建超, 程会川. 喷射条件对气溶胶烟幕释放效果的影响[J]. 科学技术与工程, 2021 (16): 6746.
- [14] 张国强. 柴油-空气气溶胶生成方法及其稳定性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [15] Lombi E, Donner E, Scheckel K G, *et al.* Silver speciation and release in commercial antimicrobial textiles as influenced by washing [J]. Chemosphere, 2014, 111: 352.
- [16] Lanz V A, Prévôt A S H, Alfarra M R, *et al.* Characterization of aerosol chemical composition with aerosol mass spectrometry in central europe: an overview [J]. Atmos Chem Phys, 2010, 10: 10453.
- [17] Anand S, Mayya Y S, Yu M, *et al.* A numerical study of coagulation of nanoparticle aerosols injected continuously into a large, well stirred chamber [J]. J Aerosol Sci, 2012, 52: 18.
- [18] Jiang J K, Oberdörster G, Elder A, *et al.* Does nanoparticle activity depend upon size and crystal phase [J]. Nanotoxicology, 2008, 2: 33.
- [19] Lorenz C, Windler L, von Goetz N, *et al.* Characterization of silver release from commercially available functional (nano) textiles [J]. Chemosphere, 2012, 89: 817.
- [20] Windler L, Lorenz C, Von G N, *et al.* Release of titanium dioxide from textiles during washing [J]. Environ Sci Technol, 2012, 46: 8181.
- [21] Bakand S, Hayes A, Dechsakulthorn F. Nanoparticles: a review of particle toxicology following inhalation exposure [J]. Inhal Toxicol, 2012, 24: 125.
- [22] Sodeifian G, Sajadian A S. Solubility measurement and preparation of nanoparticles of an anticancer drug (Letrozole) using rapid expansion of supercritical solutions with solid cosolvent (RESS-SC) [J]. J Supercrit Fluid, 2018, 133: 239.
- [23] Bai C, Gosman A D. Development of methodology for spray impingement simulation [J]. SAE Transact, 1995, 104: 550.
- [24] Arcoumanis C, Gavaises M. Effect of fuel injection processes on the structure of diesel sprays [J]. SAE Transact, 1997, 106: 1025.

引用本文格式:

中 文: 胡卉, 崔洋, 徐震, 等. 液体气溶胶粒子间相互作用的仿真研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2022, 59: 034002.

英 文: Hu H, Cui Y, Xu Z, *et al.* Simulation study of interaction between liquid aerosol particles [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2022, 59: 034002.