

化学爆炸事故中钚气溶胶扩散沉积数值模拟

邱泓博, 王 涛, 王金涛, 李宇恒

(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要: 为了更准确认识化学爆炸事故放射性烟云运动的轨迹和规律特征, 基于街区尺度, 结合钚材料在爆炸载荷作用下形成气溶胶粒子的源项经验数据, 建立了化学爆炸事故放射性烟云的计算流体力学理论模型, 模拟了烟云中钚气溶胶的大气扩散及近地沉积过程, 分析了单风向条件下建筑区域流场对钚气溶胶扩散和沉积的影响。根据数值模拟结果, 结合不同粒径气溶胶粒子的扩散行为, 对化学爆炸事故的应急处置提出了建议。研究发现: 大粒径钚气溶胶粒子在近地处的行为受建筑区域流场影响明显, 在扩散和沉积过程中, 烟团主体在垂直风场方向上出现偏移; 小粒径气溶胶粒子在大气中扩散时表现出烟团主体的偏移、抬升和烟团边缘的发散等行为特征, 并随烟团所在高度的增加而减弱。

关键词: 计算流体力学; 化爆事故; 钚气溶胶; 扩散沉积

中图分类号: X591

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)01-012-12

Numerical Simulation of the Diffusion and Deposition of Plutonium Aerosol in Chemical Explosion Accident

QIU Hongbo, WANG Tao, WANG Jintao, LI Yuheng

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shaanxi)

ABSTRACT: To develop a more accurate picture of chemical explosion accident, as well as the trajectory and regular characteristics of the smoke cloud movement, a computational fluid dynamics (CFD) theoretical model of radioactive cloud generated in chemical explosion accident was established based on the empirical data of block scale and the source term of aerosol particles formed from plutonium materials under explosive loads. Thereby, the atmospheric diffusion and near-Earth deposition process of the plutonium aerosols in smoke clouds were simulated and the influence of the flow field in the building area on the diffusion and deposition of plutonium aerosols under the condition of single wind direction were analyzed. Furthermore, suggestions for the emergency dispose of outdoor chemical explosion accidents were put forward according to the numerical simulation results and diffusion and deposition behavior characteristics of aerosol particles with different particle sizes. Results showed that the behavior of large plutonium aerosol particles in the near-Earth area is obviously affected by the flow field in the architectural region. And the

收稿日期: 2023-11-17

基金项目: 陕西省自然科学基金 (2024JC-ZDXM-01)

第一作者: 邱泓博 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事化爆事故放射性气溶胶扩散行为研究。E-mail: 553575233@qq.com

通信作者: 王涛 (1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事特种装备性能检测与评估研究。E-mail: wtao009@163.com

引用格式: 邱泓博, 王涛, 王金涛, 等. 化学爆炸事故中钚气溶胶扩散沉积数值模拟[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (1): 12-23.

main body of the their smoke mass shifts in the direction of the vertical wind field during the process of diffusion and deposition. Simultaneously, the main body of the small aerosol particles smoke mass shifts and rises, while the edge of the smoke mass diverges in the vertical direction. Behaviors of the small aerosol particles smoke mass weaken with the increase of the initial release height.

KEYWORDS: computational fluid dynamics; chemical explosion accident; plutonium aerosols; diffusion and deposition

钚金属是核能领域常用的重要材料之一, 化学性质活泼, 常温常压条件下就能在空气中发生氧化反应, 形成剧毒的气溶胶物质。发生化学爆炸(化爆)事故时, 核材料中的钚部件在爆炸冲击波和高温作用下会破碎、氧化形成大量放射性气溶胶, 并通过卷吸作用随爆轰产物抬升形成柱状烟云, 最终在流场稳定后随大气流动扩散^[1]。其中, 大粒径的钚气溶胶粒子受重力作用在地面沉积, 而小粒径粒子将长时间悬浮并沿风向传播, 从而影响更远的区域, 对人们身体健康和生命安全造成危害。为了有效预防和控制此类事件对环境和公众安全带来的严重影响, 对放射性气溶胶传播规律的研究具有十分重要的意义。过去对放射性气溶胶扩散及污染的分析主要以采用高斯烟羽模型为主, 但是唐秀欢等^[1]研究发现, 高斯烟羽模型在模拟烟云近地扩散时存在局限性, 且其计算的准确度仅适用于早期的烟云扩散。

随着计算机运算能力的提升和计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)守恒方程求解的研究发展, CFD理论模型在颗粒污染物扩散研究中的应用越来越广泛, 模型的空间尺度也越来越大。丁世海^[2]、李铨骏等^[3]建立了小尺度烟气中小粒径颗粒物的扩散模型, 采用离散相模型(Discrete Phase Model, DPM)模拟并分析了不同粒径气溶胶粒子受温度、风速等因素影响下的扩散规律, 肖媛等^[4]建立了街区尺度中的生物气溶胶传播模型, 并进行了模型网格尺度无关性验证。CFD理论模型在化爆事故研究中也具有初步应用, 袁伟等^[5]建立了地下封闭空间内发生化爆的CFD理论模型, 对可压缩条件下放射性气溶胶粒子的释放和扩散进行了简化模拟。相应的一些研究也指出CFD理论模型可以解决高斯烟羽模型模拟放射性烟云扩散时准确度较低的问题, 如杨梦婕等^[6]指出可以通过使用CFD理论修正高斯模型的方法来建立准确度更高的预测模型。但目前使用CFD方法对放射性烟云大气扩散的相关研究较少,

特别是建筑区域流场对烟云扩散的影响缺少相关的分析和规律总结。

本文以静态化爆事故产生的钚气溶胶烟云向城区扩散为背景, 分别建立了2种不同粒径分布的放射性气溶胶烟云的CFD理论模型, 并使用DPM粒子模拟了钚气溶胶粒子受单向风作用条件下在大气中的扩散和沉积过程, 分别对其扩散轨迹和规律进行比对和分析。

1 基本假设

对于已知的等温不可压缩流场, 在不考虑DPM粒子对流场连续相反作用力的条件下, DPM粒子从各节点获取压力、速度等参数来计算运动轨迹, 而不会改变各节点的参数, 各粒子之间的受力及运动相互独立, 可以有效减小计算量。采用DPM粒子模拟钚气溶胶粒子进行扩散沉积的计算, 并做出以下假设^[5]: (1) 钚气溶胶粒子为均匀球形颗粒, 不考虑粒子形状对扩散运动性质的影响; (2) 忽略DPM粒子运动对流场连续相的反作用; (3) 烟云初始压力、温度和密度与大气条件一致, 流体运动视为等温不可压流动; (4) 忽略气溶胶粒子凝聚及颗粒聚团的破碎现象; (5) 忽略小粒径粒子布朗运动对气溶胶烟云整体扩散行为的影响。

根据假设, 离散相粒子在流场中运动主要受4种力的作用: 流场曳力、空气阻力以及粒子所受重力和浮力。粒子受力模型^[5]由以下公式定义

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_D(\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p) + \frac{g(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} \\ \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{u}_p \end{cases}$$

式中: $\mathbf{u}_p$ 和 $\mathbf{u}_f$ 分别为DPM粒子和流体的速度矢量; g 为当地重力加速度; ρ_p 和 ρ_f 分别为DPM粒子和流体的密度; $\mathbf{r}$ 为DPM粒子的位移矢量; $\mathbf{F}_D$ 为流体作用于DPM粒子上的曳力矢量, 计算公

式^[5]为

$$\begin{cases} F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \\ Re = \frac{\rho_f d_p |u_f - u_p|}{\mu} \end{cases}$$

式中： μ 为DPM粒子的粗糙度系数； C_D 为空气阻力系数； Re 为颗粒雷诺数； d_p 为DPM粒子直径。

2 模型建立及条件控制

2.1 物理模型

以核装置发生静态化爆事故为背景，假设在建筑区域上风方向距计算域底面中心 500 m 处发生化爆事故，形成柱状放射性烟云。构建街区尺度流体力学模型^[4]如图 1 所示，其中，阴影部分为建筑。建筑区域由 4 处底面为正方形的建筑物和 2 处底面为长方形的建筑物组成，其中建筑物最高高度为 80 m，最低高度为 10 m，建筑物壁面边界距离模型底面中心最远为 186 m。模型对应的空间直角坐标系设置如下：规定地面为 x - z 平面，以下风方向为 x 轴正方向，重力方向对应 y 轴负方向（以下各图中均沿用此坐标轴设置）。

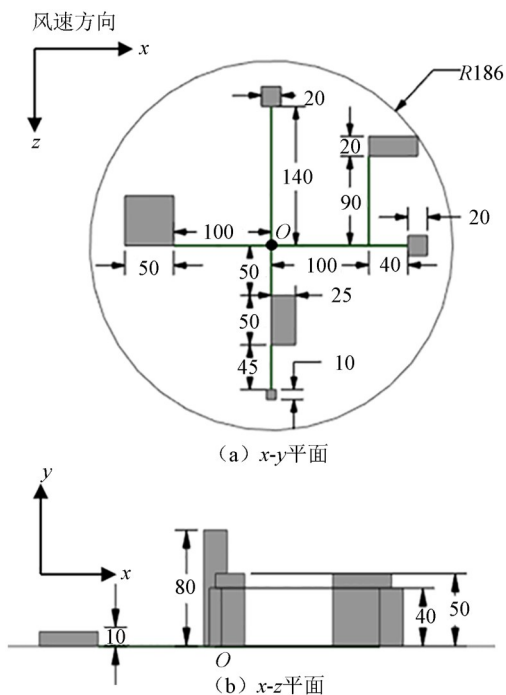


图 1 建筑区域模型 (单位: m)

Fig. 1 Architectural region model (unit:m)

根据日本建筑学会 (AIJ)^[7]对建筑区域及计算域的规范，计算区域顶部边界距离最高建筑物

顶部应大于 $5H$ (H 为最高建筑物高度)，即离地面高度应大于 480 m，本文取 500 m；计算域四周边界与建筑物区域的最小距离应大于 $15H$ ，即 1 200 m，再加上建筑物区域，其计算域半径应不小于 1 386 m。本文取 1 500 m，且堵塞率小于 3%。因此，模型计算域为 3 000 m $\times$ 3 000 m $\times$ 500 m 的立方体区域，计算域设置如图 2 所示。

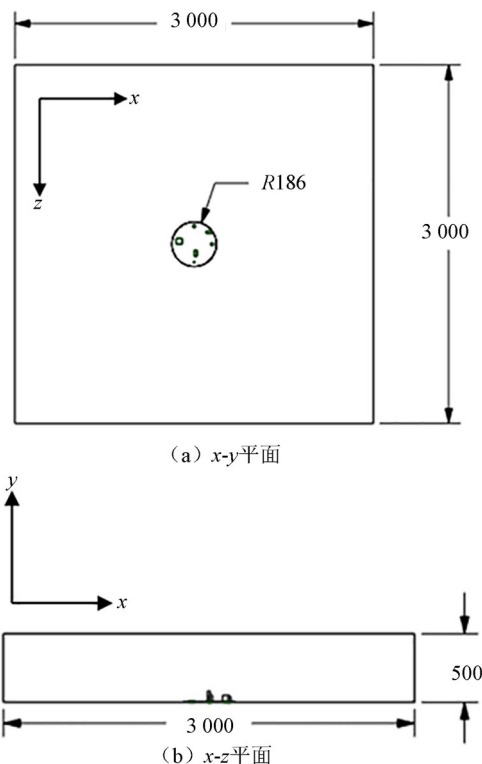


图 2 计算域尺寸设置 (单位: m)

Fig. 2 Size settings of the computational domain (unit:m)

模型基于 Fluent meshing，采用四面体非结构化网格划分方法，网格局部划分结果如图 3 所示。为控制网格纵横比和扭曲度，最大面网格长度限制为 15 m；由于模型需要考虑放射性气溶胶粒子在近地处建筑区域的运动行为，故分别对地面和建筑壁面网格进行 8 m 和 0.5 m 的加密处理；并对所有建筑壁面添加 10 层边界层，其中第 1 边界层厚度为 0.1 m，边界层膨胀率为 1.2。

经网格划分及网格质量局部优化改进，模型网格最小正交质量为 0.221 199 2 (>0.1)，最大纵横比为 15.819 2 (<30)，符合 CFD 模型计算的网格质量要求；模型网格总数为 13 617 189 个，根据街区尺度流体力学仿真中测压的计算网格无关性验证^[4]，符合考虑近地处沉积条件下的模型计算对壁面和近地处测压的精确度要求。

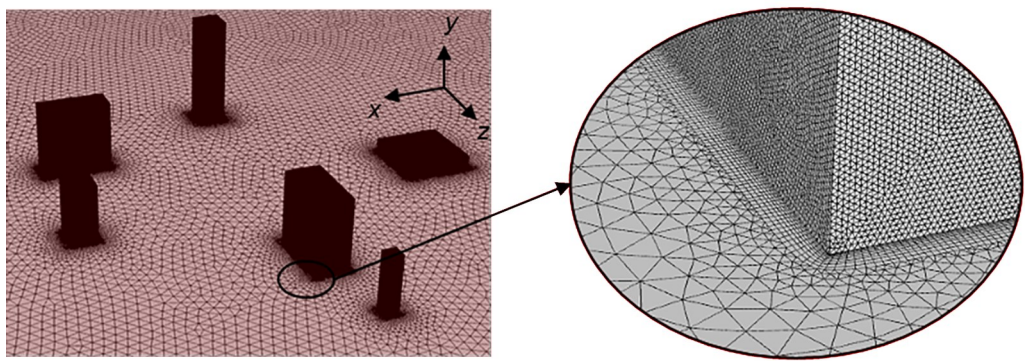


图 3 模型建筑区域局部网格划分
Fig. 3 Local mesh of the architectural region

2.2 DPM 粒子粒径分布初始条件

采用核装置发生化爆释放的放射性气溶胶粒径分布模型数据^[5], 各粒径分布范围及对应的初始释放质量分数如表 1 所示。

表 1 ²³⁹Pu 气溶胶粒子粒径分布
Tab. 1 Particle size distribution of ²³⁹Pu aerosol particles

释放源 编号	粒径范围/ μm	粒子质量/ kg	粒子质量 分数/%	颗粒行为
①	0.01~0.045	0.282 910	5	长期悬浮
②	0.1~0.45	0.565 820	10	长期悬浮
③	1~4.5	3.677 830	65	长期悬浮
④	10~45	0.509 238	9	部分沉降
⑤	20~90	0.452 656	8	部分沉降
⑥	50~225	0.113 164	2	完全沉降
⑦	100~450	0.056 582	1	完全沉降

钚气溶胶粒子粒径为 0.01~450 μm, 共有 7 个不同的分布范围, 按照粒径由小到大排序分别编写 DPM 粒子释放源, 并编号为①~⑦, 由于不同释放源所释放的 DPM 粒子的粒径分布不同, 因此, 释放源的编号也对应其所释放的 DPM 粒子的编号。根据粒子在空气中的扩散行为不同可以将其行为分为长期悬浮、部分沉降和完全沉降 3 种。其中, 所占质量分数最大的 DPM 粒子编号为③, 对应气溶胶颗粒在大气中扩散表现为长期悬浮, 也是研究化爆核事故放射性气溶胶需要重点关注的对象。

各粒径分布范围内的 DPM 粒子释放方式采用 Rosin-Rammler 分布^[8]定义, 各粒径范围内的粒径分布占比按以下公式确定:

$$R(d) = \exp(-(d/d_e)^n)$$

式中: $R(d)$ 为粒径 d 对应的质量分数; d_e 为某粒径范围内的特征粒径; n 为粒径范围内的分散系数。由于目前关于化爆事故中放射性气溶胶粒子的数据偏少且难以精确测量, 在此用各粒径分布范围的中值作为对应的特征粒径, 分散系数取默认值 3.5 进行简化近似处理。

2.3 2 种烟云初始条件设置

发生化爆事故后, 放射性烟云经过膨胀、抬升和冷却, 流场逐渐达到稳定状态, 取此时作为初始时刻进行计算。按照经验上的观点, 在烟云完全稳定后, 放射性气溶胶粒子按粒径大小在柱状烟云的垂直方向分布, 粒径越大的气溶胶粒子越接近地面; 但实际上, 由于烟云形成初期涡环结构抬升过程的影响, 不同粒径的气溶胶粒子在烟云各高度位置均有分布。然而, 目前缺少对烟云中具体粒径分布谱的实验和理论研究, 而常采用均匀粒径谱进行简化替代^[1], 由此建立了 2 种不同的放射性气溶胶粒子在初始烟云中分布的简化物理模型, 忽略烟云抬升过程中风场对烟柱的影响, 如图 4 所示。

2.3.1 模型 1

第 1 种为按粒径分层的柱形烟云物理模型 (模型 1), 采用体积注入方法在初始时刻将 DPM 粒子添加到烟云模型中, 结合美国曾进行的 Roller Coaster 核材料化爆实验源项数据^[9-10], 烟云总高度和半径由以下经验公式确定:

$$\begin{cases} H_{\text{TNT}} = 61.54 \omega^{\frac{1}{4}} \\ R_{\text{TNT}} = 13.13 \omega^{\frac{1}{4}} \end{cases}$$

式中: H_{TNT} 为在 TNT 炸药爆炸作用下烟云的高度 (m); ω 为炸药爆炸的 TNT 当量 (kg); R_{TNT} 为爆炸形成稳定烟云的半径 (m)。

经计算以及参考文献中的经验数据^[1], 当化爆核事故中有 53.52 kg TNT 当量的炸药发生爆炸时, 烟云完全稳定后将形成半径约 35 m、高度约 250 m 的柱状烟云。按 35 m 的间隔将烟云沿高度方向划分为 7 个均匀的初始烟团。假设此时不同粒径的放射性气溶胶粒子已经运动至相互分离的状态, 每个烟团中气溶胶粒子为均匀分布。具体模型如图 4 (a) 所示, 虽然该模型与真实情况存在差异, 但由于不同粒径的粒子之间有明显分层, 各粒径粒子分布范围相对集中。因此, 采样得到的数据更便于反映不同粒子的扩散行为, 便于对比和观察。

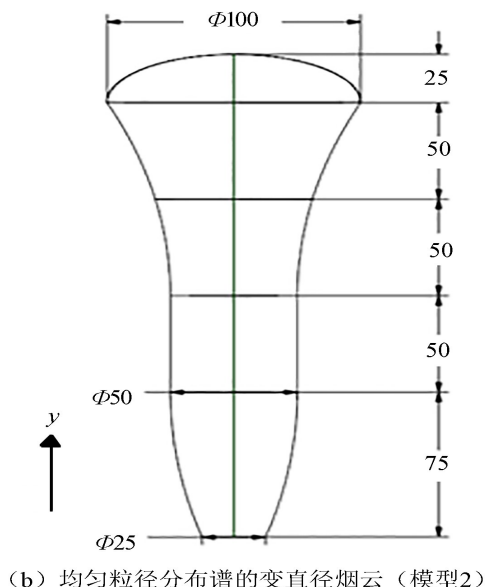
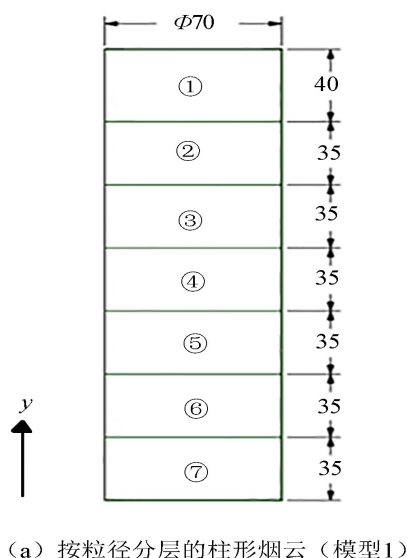


图 4 放射性气溶胶初始烟云的 2 种简化模型 (单位: m)

Fig. 4 Two simplified models of the initial smoke cloud of radioactive aerosols (unit:m)

2.3.2 模型 2

真实情况下化爆产生的烟云受涡环结构热抬升运动的影响, 其水平直径在高度方向上的分布并不是均匀的。通过对比中小当量和大当量爆炸条件下放射性烟云的形成过程^[11-12]可知, 烟云稳定后的结构可以分为主云和尘柱 2 部分, 其中: 主云由于扩散作用的影响, 其水平直径会大于烟云初始直径; 而尘柱的水平直径会偏小。

按照烟云水平截面由下到上的直径变化, 可以大致将烟云在高度方向上分为 5 个层区: 底部层区烟云的水平直径由下至上逐渐增加至稳定烟柱的直径, 稳定柱形层区烟云直径不再变化, 约持续至烟云中间高度位置; 过渡层烟云接近上升烟团区域, 烟云直径再次逐渐增加; 烟云高度 70% 处为烟云中气溶胶浓度分布的重心位置^[1], 也是接近热抬升结束后涡环结构的位置, 烟云水平直径在该区域顶部膨胀至最大值; 烟云顶端层直径逐渐减小, 简化为弧形结构。将尘柱结构的水平直径缩小至 50 m, 主云结构的最大水平直径调整为 100 m, 最终得到第 2 种模型, 即粒径谱均匀的变直径烟云物理模型 (模型 2), 如图 4 (b) 所示。沿高度方向各垂直分层气溶胶粒子的密度分布函数按以下经验公式^[1]确定:

$$f(x) = -1.2 \times 10^{-3} + \frac{7.425 \times 10^{-2} \exp\left(\frac{x-80.5}{22.15}\right)}{\left(1 + \exp\left(\frac{x-80.5}{22.15}\right)\right)^2}$$

式中: x 表示高度 (m); $f(x)$ 表示该高度处气溶胶粒子所占的质量分数密度, 通过对 $f(x)$ 积分就能得到不同高度区间内气溶胶粒子的质量分数。经计算得到各垂直分层中气溶胶粒子质量分数如表 2 所示。

表 2 不同垂直分层高度范围及气溶胶粒子质量分数

Tab. 2 The height range of each layer and the mass proportion of aerosol particles

烟云分层	高度比/%	高度范围/m	粒子质量分数/%
底层	0~30	0~75	7.43
柱形层	30~50	75~125	15.48
过渡层	50~70	125~175	27.56
重心层	70~90	175~225	34.10
顶层	90~100	225~250	15.46

为便于观察和对比模型 1 中气溶胶烟团按粒径

大小分层对计算结果的影响, 模型2的烟云模型各分层中不同粒径分布的气溶胶粒子为均匀释放, 即每个烟云分层中都将释放所有粒径分布的气溶胶粒子, 仅通过粒子质量分数控制各粒径分布气溶胶粒子的释放总额。

2.4 边界条件

模型边界由壁面 (wall)、对称边界 (symmetry)、速度入口 (velocity-inlet)、压力出口 (pressure-outlet) 构成, 如图5所示。

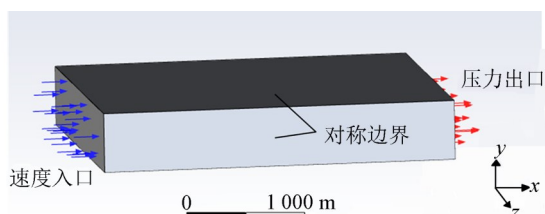


图5 模型计算域边界设置

Fig. 5 Boundary conditions of the computational domain

其中: 地面和建筑壁面均为刚性壁面类型; 速度入口边界和压力出口边界分别对应上风方向和下风方向边界; 计算域顶部和两侧流体运动视为层流, 符合对称边界条件, 同时也能加快模型的收敛速度。

所有刚性壁面类型边界均采用标准壁面函数。地面的DPM作用条件设置为“捕获”(trap); 建筑壁面的DPM作用条件设置为“贴壁射流”(wall-jet), 即离散相粒子与建筑壁面接触后根据壁面扰流和粒子速度等因素发生弹性散射或被壁面捕获; 出入口边界的DPM作用条件均设置为“可逃逸边界”(escape)。

入口边界处采用风廓线的指数律形式模拟真实风场, 以距地面10 m高度处的风速作为参考高度风速, 风速沿高度分布用函数形式可表示为^[12]

$$V_h = V_g \left(\frac{h}{h_g} \right)^a$$

式中: V_h 代表高度 h 处的风速 (m/s); V_g 代表参考高度 h_g 处的风速 (m/s)。

模型中: h_g 取10 m; a 为当地粗糙度系数, 取值为0.15; 为防止风速过快而导致气溶胶烟云被破坏, 取城区微风条件以将风速控制在5级以内, 即 V_g 取3.4 m/s。初始化后得到入口风速的分布云图, 如图6所示。

由图6可以看出, 随高度增加, 入口处风速呈指数增长。采用10 m高度作为参考风速高度, 对应气象报告风速参考高度, 利于获取模型的入口风速信息。

2.5 计算参数设置

模型采用SIMPLE算法, 基于压力-速度耦合, 并选择适用于街区尺度等温不可压缩流场计算的RNG $k-\epsilon$ 模型进行求解^[4]。梯度插值方法选用Green-Gauss基于节点的插值方法, 压力、动量插值方法采用二阶迎风格式, 湍流动能及耗散率插值则采用一阶迎风格式, 时间项采用一阶显式格式进行离散。

采用从稳态到瞬态过渡的方式对模型进行求解, 即先采用稳态计算得到稳定的流场, 再引入DPM粒子进行瞬态计算, 最终得到粒子在流场中的运动轨迹。稳态计算使用伪时间步法来加快收敛, 当模型的各项残差在迭代中达到默认收敛条件 ($<10^{-3}$) 时改为瞬态计算。瞬态计算自定义时间步长0.25 s, 共计算500 s, 并通过DPM采样分别获取不同时刻粒子在地面和空间中的分布情况。

稳态计算得到的流场在近地处的流速矢量分布如图7所示。可以看出, 由于受到壁面阻挡, 有风条件下近地处流场表现为湍流流动, 建筑体迎

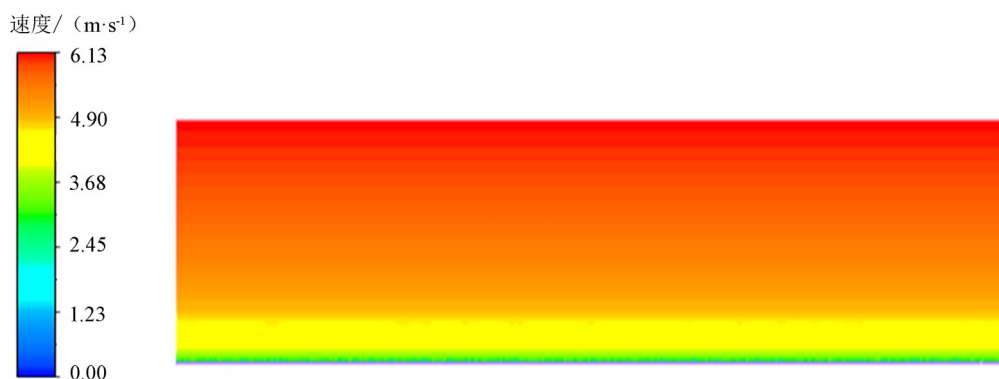


图6 计算域入口边界风速云图

Fig. 6 Nephogram of wind speed at the inlet boundary of the computational domain

风和背风方向均存在绕流,且可以观察到其中距离相近的建筑周围流场存在相互作用。可见,CFD方法具有能详细描述流场参数的优点。然而在该模型所设置的计算域大小下,模拟得到该稳态流场需要数小时的时间。这是因为求解离散守恒方程需要满足迭代残差要求才能确保结果的准确度,而采用相近计算网格尺寸的高斯烟羽模型时,其计算速度在数分钟内能够得到大致的预测结果^[1]。显然,这2种模型分别具有计算精确度高和计算量小的优点,如果能从CFD方法中总结出气溶胶粒子烟云扩散的规律,如大粒径粒子沉积导致的份额丢失、烟团经过建筑上方流场的行为变化等,用于对高斯烟羽模型进行修正,就能得到满足工程应用需要的预测模型。

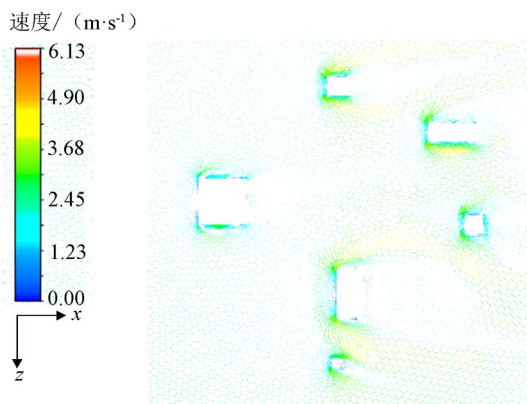


图7 近地流场速度矢量分布

Fig. 7 Vector diagram of near-Earth flow field velocity

3 分析与讨论

3.1 放射性气溶胶粒子近地沉积情况

粒径 $\geq 20 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子无法长期悬浮在空气中,会在扩散过程中逐渐沉积到地面或建筑壁面并被吸附。对地面沉积的DPM粒子的采样数据进行处理,得到2种烟云模型的气溶胶粒子总体沉积情况,如图8、图9所示。

进入建筑区域前,大粒径的气溶胶粒子已经开始在地面沉积,由于模型1中不同粒径粒子释放高度不同,部分粒子受到建筑壁面抬升扰流的影响,导致 x 坐标轴0 m附近沉积份额下降,并在200 m后又出现小幅增加,对应图9(a)中粒子沉积分布在 z 轴正方向出现的“凹陷”;相比之下,模型2中粒子沉积较为均匀,且沉积份额总体上呈下降趋势。

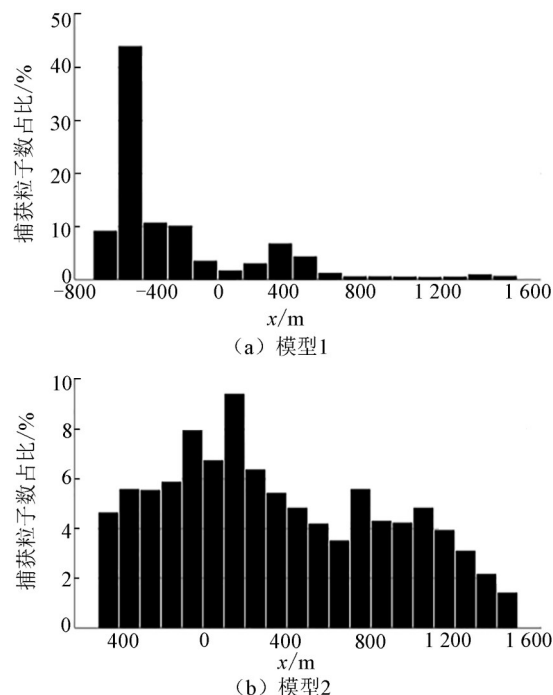


图8 放射性气溶胶粒子沿 x 方向地面沉积数量占比

Fig. 8 Proportion of aerosol particles deposited on the ground along the x -axis

进入建筑区域后,模型1的计算结果显示,气溶胶粒子受到壁面阻挡和湍流影响,在地面的沉积行为较层流区域发生明显变化,在 z 轴正负方向上分别出现了不同程度的扩散。其中,在 z 轴正方向上对应的模型建筑分布较为分散,且近地迎风面积小。因此,扩散主要受湍流影响,垂直方向上的扩散距离最远可超过100 m;而在 z 轴负方向上的扩散由于受到建筑物的阻挡作用,扩散的尺度有所减小,扩散的最远垂直距离在60 m内。

模型2中对地面沉积分布的计算结果与模型1基本类似,但由于底部烟云直径更小,且各烟云分层中为均匀粒径均匀分布谱,粒子总体上在 z 轴方向上的扩散距离更短,但也存在极少部分粒子由于初始释放位置较高,导致最终在 z 轴正方向的扩散距离超过了模型1中的最远距离。由于模型2中各粒径气溶胶粒子的释放体积较大,导致释放份额少的几种粒子的地面采样数据稀疏,不利于观察规律。考虑到2种模型中粒子地面沉积的总体分布情况大致相似,下文主要对模型1地面沉积采样数据中的各粒径的数据分别进行分析。

粒径差异会影响气溶胶粒子的沉积分布。图10为模型1中的DPM粒子④~⑦在地面的沉积分布情况(按粒径由大到小排序)。

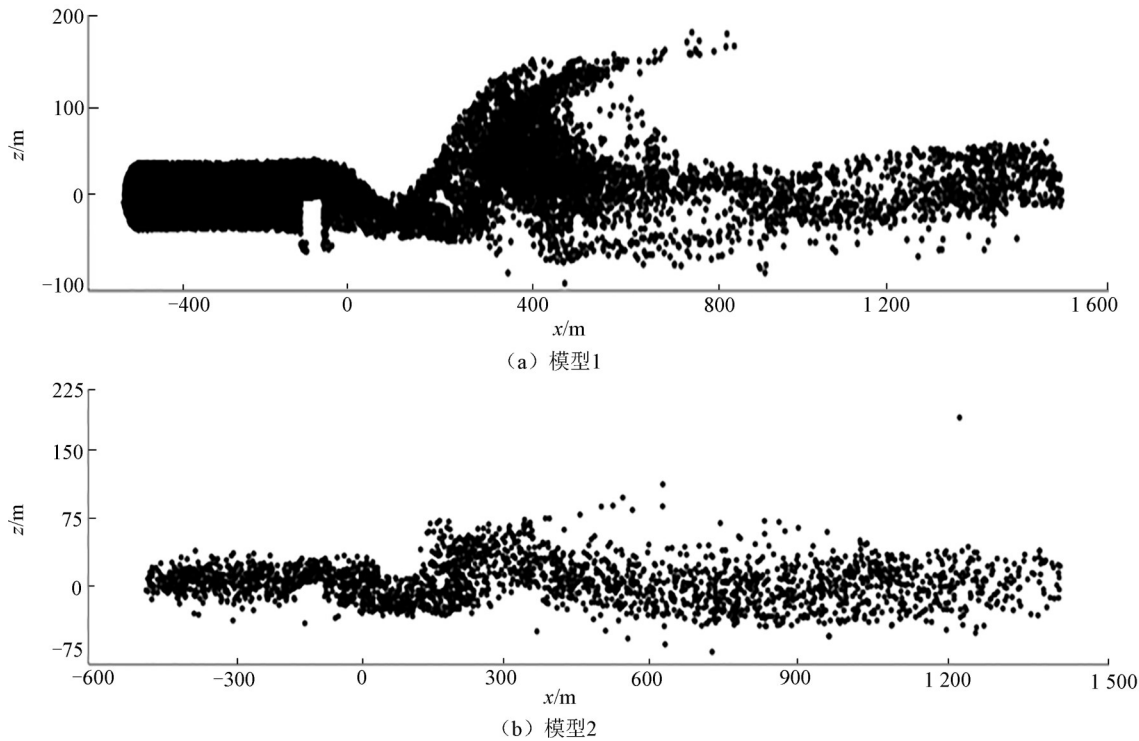


图 9 放射性气溶胶粒子地面沉积分布

Fig. 9 Terrestrial deposition distribution of radioactive aerosol particles

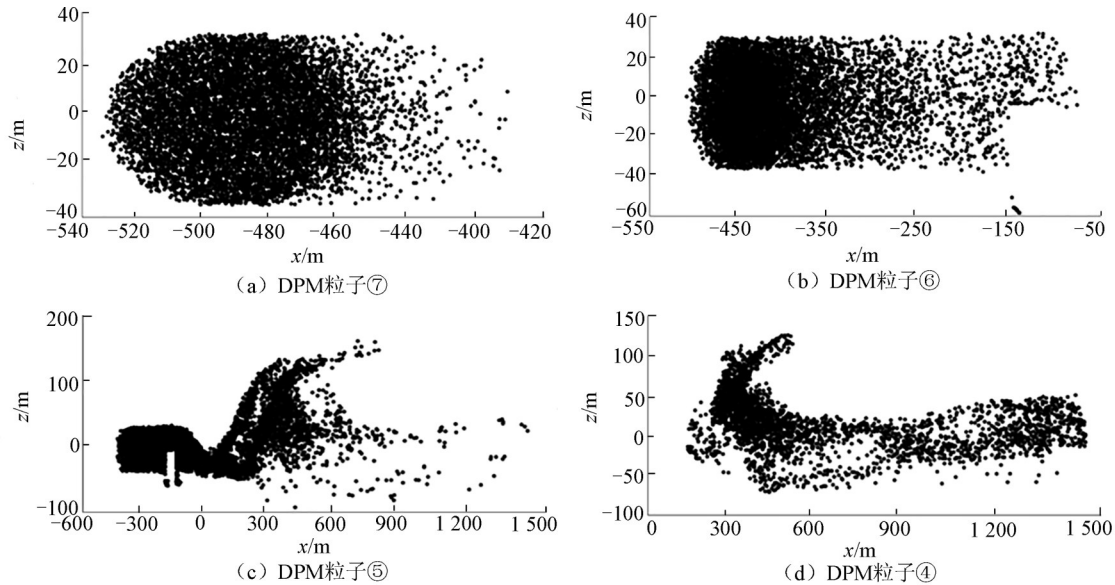


图 10 模型 1 中不同粒径放射性气溶胶粒子的地面沉积分布

Fig. 10 Distribution of terrestrial deposition of radioactive aerosol particles of different particle sizes in Model 1

由图 10 (a) 可知: 粒径最大的气溶胶粒子受沉降作用明显, 且因释放的初始高度低, 故在地面的沉积范围最小, 且沉积分布较为集中, 在模型设置的风速条件下, 其在 x 方向上的最大扩散距离小于 100 m; DPM 粒子⑥同样在计算域内完全沉降, 最远沉降区域与初始释放位置间的距离已经达到 400 m; DPM 粒子⑤大部分粒子在计算

域内发生沉降, 少量气溶胶粒子脱离计算域, 且在层流区域和建筑周围的湍流区域均有沉积份额, 主要沉积区域分布在 x 轴方向上 $(-350, 500)$ m 范围内, 且在 $(0, 500)$ m 范围中的沉积分布受建筑区域流场影响明显; DPM 粒子④经过 2 km 的扩散仍未完全沉降, 相较于 DPM 粒子⑤有更多的粒子脱离计算域, 气溶胶粒子的沉积均分布在建筑

区域内,脱离建筑区域后,气溶胶粒子的沉积分布也逐渐趋于稳定,可沉积粒子数量减少,且烟云主体沿 z 轴正方向发生了约 20 m 的偏移。

3.2 放射性气溶胶粒子的大气扩散行为

分别取模型 1 中 DPM 粒子①~③在 x - y 平面、 x - z 平面的采样数据作图。为了便于显示粒子总体的轨迹特征,对采样散点元素使用分箱方法进行处理,最终得到不同粒径分布放射性气溶胶烟云的大气扩散轨迹,如图 11~13 所示。

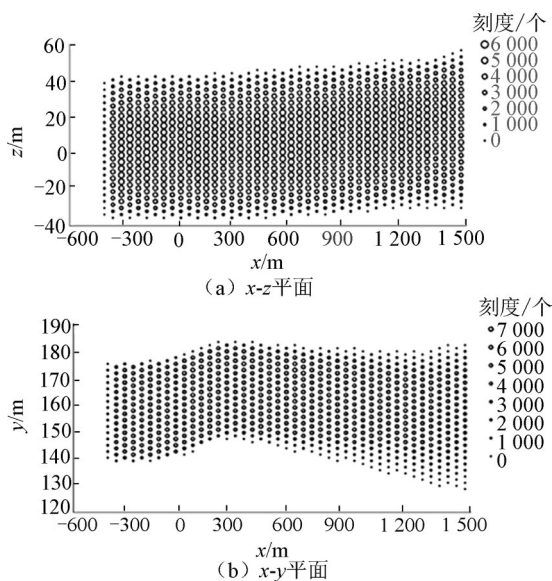


图 11 模型 1 中 DPM 粒子③大气扩散采样分布

Fig. 11 Distribution of atmospheric diffusion of DPM particle ③ in model 1

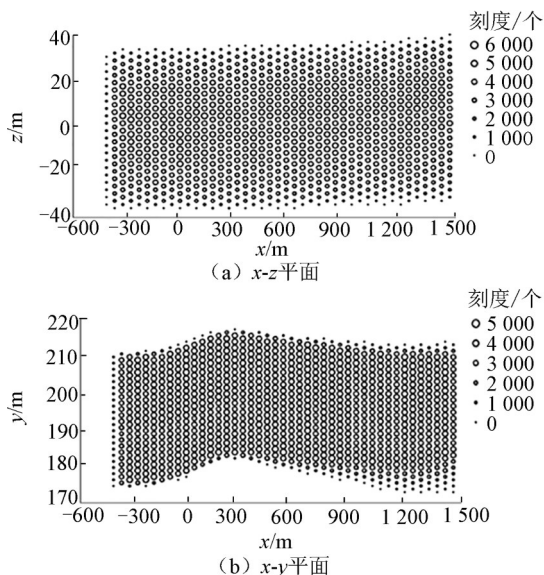


图 12 模型 1 中 DPM 粒子②大气扩散采样分布

Fig. 12 Distribution of atmospheric diffusion of DPM particle ② in model 1

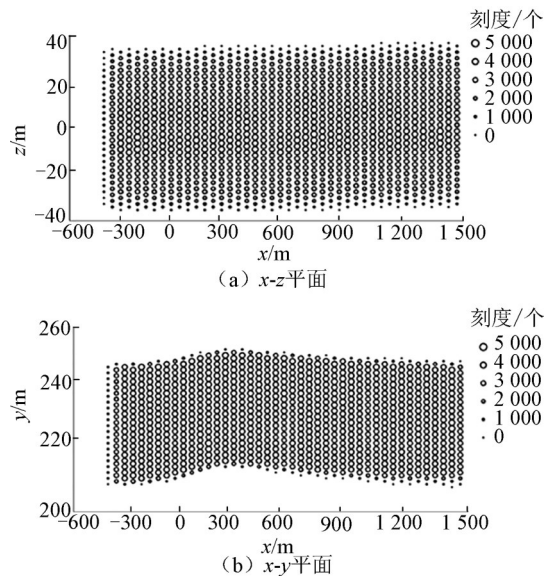


图 13 模型 1 中 DPM 粒子①大气扩散采样分布

Fig. 13 Distribution of atmospheric diffusion of DPM particle ① in model 1

DPM 粒子③所占化爆释放气溶胶份额质量分数最大,且粒径范围内所有粒子均为长期悬浮粒子,在风场作用下具有较远的传播距离,是化爆条件下放射性气溶胶污染范围评估的重要对象。由图 11 可知,该粒径分布范围内的烟团主体的扩散在 x 轴(-350, 1 200) m 出现抬升现象,抬升高度在 150 m 处达到峰值(约 10 m)。而后烟团主体基本恢复初始释放高度,在 y 轴方向,烟团边缘出现发散现象,粒子的分布范围沿 y 轴正方向增加约 5 m,沿 y 轴负方向增加约 10 m。放射性烟团的主体沿 z 轴正方向出现约 10 m 的偏移。

由图 12 和图 13 可知,DPM 粒子①、②的扩散行为与 DPM 粒子③相似,发生抬升现象以及抬升峰值对应 x 轴方向上的范围基本一致,且均能观察到烟团主体沿 z 轴正方向的偏移现象,但抬升和偏移的尺度随烟团初始高度的增加而减小。对于烟团初始释放高度最高的 DPM 粒子①,烟团最高抬升高度以及沿 z 轴正方向的偏移距离仅有约 5 m。随着烟团初始高度的提升,气溶胶粒子发生脱离烟团主体扩散的行为逐渐减弱,此现象在 y 轴方向 210 m 以上气溶胶初始烟团中基本消失,烟团主体保持稳定传播。

烟团沿 z 轴的偏移方向与发生地面沉积的粒子的迁移方向一致,靠近地面的粒子烟团在扩散过程中由于受到 z 轴负方向的建筑壁面阻挡作用向 z 轴正方向偏移,并在后续的流场作用下持续沿该

方向扩散; 大气中的粒子则因受到该建筑周围扰流的影响, 同样沿 z 轴正方向发生偏移。因此, 固定风场条件下, 建筑具体分布以及因此产生的流场变化是烟柱整体在水平方向上的扩散行为变化的主要原因。

模型2中DPM粒子②、③的扩散数据经采样和分箱处理后的结果如图14、15所示。为了便于与模型1的计算结果进行比较, 截取高度范围为(120, 250) m。

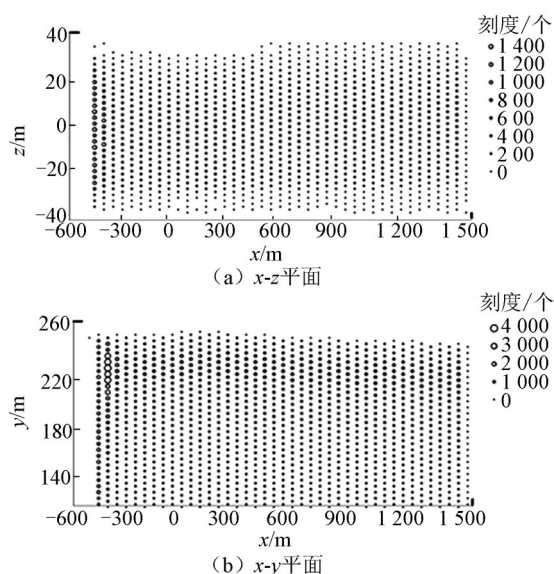


图14 模型2中DPM粒子②粒子大气扩散采样分布

Fig. 14 Distribution of atmospheric diffusion of DPM particle ② in model 2

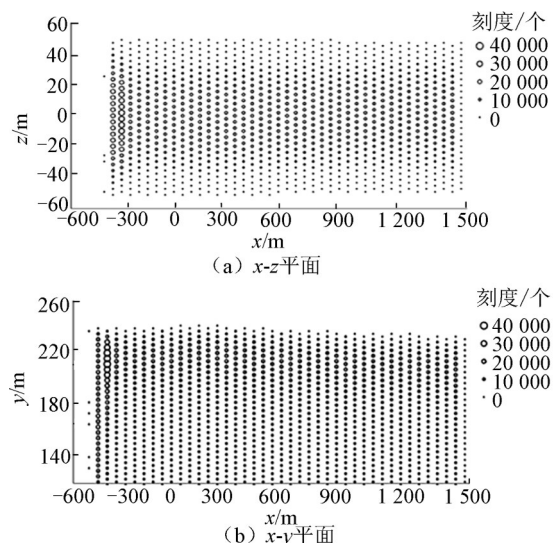


图15 模型2中DPM粒子③粒子大气扩散采样分布

Fig. 15 Distribution of atmospheric diffusion of DPM particle ③ in model 2

由图14、15可以看出, 由于模型2中重心层

和顶部单位体积中的粒子释放份额较大, 经过分箱处理后, 该范围内的散点元素明显更密集, 但也能大致观察到烟团主体发生的抬升和扩散现象, 且尺度与模型1的计算结果基本能够对应。此外, 还可以看出, 不同粒径的悬浮粒子发生这2种现象的尺度没有较大差异。

放射性气溶胶粒子烟团扩散行为的变化来源于地面建筑对流场的影响, 且不论是大粒径的气溶胶粒子在近地处的沉积, 还是高空中小粒径气溶胶粒子的扩散行为, 都会受到影响。在单风向风场条件作用下, 高空中气溶胶烟团经建筑区域所在流场后发生的作用, 可以概括为3类: 垂直抬升、水平偏移和边缘发散, 且3种行为均随气溶胶初始释放高度的增加而减弱。

根据图13(a)和图14(a)中的结果, 烟团的边缘发散现象在高度225 m处(初始烟云直径最大高度处)已经基本消失。由于模型中的建筑均为方形, 且迎风壁面均正对风向方向, 因此, 烟团抬升主要受建筑高度影响。建筑区域中与烟云有直接作用的只有分别位于 x 轴上靠近建筑区域边界的两处建筑, 高度分别为10 m和50 m。从计算结果来看, 烟团开始抬升的初始位置与建筑区域的边界之间有接近200 m的距离, 且烟云在经过第2个直接作用的建筑后就将离开建筑区域。因此, 虽然抬升的最高点基本位于高度50 m的建筑上方, 其他建筑顶部的扰流对烟云的抬升行为是否有贡献却无法界定。故应该将烟团发生的抬升现象归结于建筑区域整体的作用, 且与区域中建筑高度的具体分布情况有关。理论上, 风速越大、建筑高度越高、越接近烟团扩散路径, 则对烟团的抬升行为影响越大。

对于模型1中的DPM粒子③, 在烟团抬升到最高点后, 垂直方向上的边缘发散现象明显, 将对该粒径气溶胶烟团的压制和处理造成困难, 而该粒径分布下的气溶胶粒子所占气溶胶粒子质量分数最高, 对环境和居民生命安全危害最大。因此, 对放射性气溶胶的压制处理最好在气溶胶烟团进入建筑区域所在流场环境前进行。若有风条件下高空中的气溶胶烟团经大气扩散运动到建筑区域上方流场, 则对其的处理需要考虑到烟团的抬升和边缘发散效应, 特别是烟团垂直方向上的边缘发散现象将导致烟团的影响范围明显扩大。

由于实际情况中烟云的中部和底部也有可悬浮粒子分布, 因此, 虽然模型1中DPM粒子③对

应的烟团经发散后最低高度在 100 m 以上, 但是烟云在流经建筑区域后对近地处造成的放射性污染程度仍将提升。

4 结论

(1) 相较于传统高斯烟羽模型, CFD 模型能够对放射性气溶胶粒子在流场中的具体行为特征进行模拟, 并且能体现其在近地处的运动和沉积行为, 进而对烟团的放射性危害进行更详细的评估, 适用于已知建筑分布条件下的事故预测。

(2) 在 10 m 参考高度的风速为 3.4 m/s 的单向风 (后续的结论均在默认为该风场条件下给出) 作用条件下, 化爆烟云中放射性气溶胶粒子发生近地沉积主要发生在沿风速方向 1 km 范围内, 其中, 500 m 内的粒子沉积量最集中; 近地气溶胶粒子在建筑区域内的扩散主要表现为沿湍流迹线运动, 在建筑区域后的扩散将出现烟团主体在水平方向上的偏移。

(3) 有风条件下建筑区域流场可能会对整个放射性气溶胶烟柱的扩散产生影响, 具体表现为烟团抬升、水平偏移和边缘发散现象。在风速、风向条件固定时, 大气中烟团扩散主要受建筑高度和具体分布影响。烟柱中初始释放位置越高的气溶胶烟团受建筑区域湍流影响越小, 但烟团扩散行为发生变化的范围基本一致。

(4) 初始释放高度在 175 m 以下的放射性气溶胶烟团在经过模型预设的建筑区域流场后, 边缘发散现象明显, 特别是烟团下边界高度明显降低, 需要重点关注对其的压制和处理。

(5) 高空中的放射性气溶胶粒子占气溶胶粒子释放份额大, 受建筑区域流场影响主要表现为烟团主体的行为。因此, 存在建立规律模型从而降低计算成本的可行性。放射性气溶胶粒子在地面的沉积受流场影响最大, 扩散行为复杂, 但所占释放份额较小, 适合进行定量分析。

参考文献:

[1] 唐秀欢, 杨宁, 包利红, 等. 核武器运输炸药爆炸事故气溶胶扩散数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(1): 142-148.
TANG X H, YANG N, BAO L H, et al. Numerical simulation of aerosol dispersion with the explosives detonation in the process of nuclear weapon transportation[J]. Journal of Safety and

Environment, 2014, 14(1): 142-148.

- [2] 丁世海, 许光, 尹振羽, 等. 应用计算流体力学分析烟囱气载流出物取样的混合均匀性[J]. 核电子学与探测技术, 2012, 32(3): 260-264, 302.
DING S H, XU G, YIN Z Y, et al. Computational fluid dynamics(CFD) analysis of stack effluent sampling mixing uniformity[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2012, 32(3): 260-264, 302.
- [3] 李铨骏, 王汉青, 孟德雨, 等. 基于湍流-布朗效应的焊接气溶胶运动特征数值模拟研究[J]. 暖通空调, 2023, 53(4): 130-136.
LI C J, WANG H Q, MENG D Y, et al. Numerical simulation of welding aerosol motion characteristics based on turbulence-Brownian effect[J]. Journal of HV & AC, 2023, 53(4): 130-136.
- [4] 肖媛, 周军莉, 桂树强, 等. 基于 CFD 模拟的街区布鲁氏菌泄漏扩散特性研究[J]. 暖通空调, 2023, 53(9): 107-114.
XIAO Y, ZHOU J L, GUI S Q, et al. Study on leakage and diffusion characteristics of Brucella in block based on CFD simulation[J]. Journal of HV & AC, 2023, 53(9): 107-114.
- [5] 袁伟, 左莉, 陈显波, 等. 地下军事建筑核事故气溶胶扩散研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(28): 8455-8459.
YUAN W, ZUO L, CHEN X B, et al. Study on the diffusion of aerosol in underground military building when nuclear accident happen[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(28): 8455-8459.
- [6] 杨梦婕, 王立锋, 姚超, 等. 基于建筑物影响下的高斯烟羽模型的研究[J]. 工业安全与环保, 2022, 48(11): 96-99.
YANG M J, WANG L F, YAO C, et al. Research on Gaussian plume model under the influence of buildings[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2022, 48(11): 96-99.
- [7] PENG S, CHEN Q, LIU E. The role of computational fluid dynamics tools on investigation of pathogen transmission: Prevention and control[J]. Science of the Total Environment, 2020, 74(6): 142090.
- [8] EPELLE E I, BANDE N, OKOLIE J A, et al. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: Effect of particle size polydispersity[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208: 109795.
- [9] CHURCH H W, LUNA R E, MILLY S M. Operation roller coaster: Near ground-level air sam-

- pler measurements[R]. Albuquerque, NM, USA: Sandia Labs, 1970.
- [10] STEPHENS D R. Source terms for plutonium aerosolization from nuclear weapon accidents: UC-RL-ID-11903[R]. Livermore, CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1995.
- [11] BROWN B, KRISPIN J, POTTS M. Projection methods for incompressible multiphase cloud rise phenomena[C]//Proceedings of the 14th Computational Fluid Dynamics Conference. Norfolk, VA, USA: AIAA, 1999: 605-614.
- [12] 段中山, 龚朋彬, 袁伟, 等. 不同风场下 TNT 炸药爆炸烟云的扩散模型及特性[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(5): 115-123.
- DUAN Z S, GONG P B, YUAN W, et al. Experimental and simulation of diffusion model and characteristics of explosive cloud at different wind fields[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(5): 115-123.

通信作者及其研究团队介绍

王涛, 男, 1978 年 7 月出生, 火箭军工程大学教授, 博士生导师, 中央军委装备发展部某专业组成员, 陕西省高等教育教学指导委员会委员, 陕西高校青年创新团队带头人, 军队首批精品课程负责人, 军队优秀硕士学位论文指导教师, 陕西省“一流”线下本科课程、课程思政示范课程负责人。出版专著教材 6 部、发表学术论文 60 余篇, 其中 SCI 检索 21 篇、EI 检索 27 篇, 授权专利 2 项、软件著作权 6 项, 获国家教学成果二等奖 1 项、军队教学成果一、三等奖各 1 项, 军队科技进步二等奖 3 项、三等奖 5 项、军事理论二等奖 1 项。主要研究方向为: 特种装备性能检测与评估、毁伤效应评估、含能材料辐照损伤等。



担任院级科研团队“特种装备应用与毁伤评估技术”带头人。团队成员共 20 人, 包括教授 3 人、副教授 7 人, 获博士学位 14 人, 入选军委科技委青年人才托举计划 1 人, 陕西省高校青年教师托举计划 2 人。主要研究方向如下:

(1) 性能检测与先进表征技术。以含能材料、高分子材料部件等为研究对象, 从微观、介观、宏观 3 个层面构建多维度性能表征方法体系, 开展材料物化性能检测、腐蚀机理和老化机制分析等关键技术研究。

(2) 特种装备运用与保障技术。针对复杂结构装配体服役状态, 分层级开展特种装备服役性能评估研究, 重点围绕含能材料部件、典型金属部件、多孔材料部件等在长期服役过程中面临的多场耦合环境, 开展损伤演化机制、性能老化机理等研究, 探索性能保持技术手段。

(3) 毁伤效应评估技术。构建典型高价值目标的毁伤评估指标体系与模型, 利用试验和数值仿真技术, 开展高价值目标易损性、毁伤元对典型目标的毁伤机理和综合毁伤评估技术研究。