

气溶胶沉降扩散研究进展 (特邀)

顾有林^{1,2,3}, 陈国龙^{1,3}, 胡以华^{1,2,3}, 何海浩^{1,3}, 丁婉莹^{1,3}, 曹浩^{1,3}

- (1. 国防科技大学 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽合肥 230037;
2. 先进激光技术安徽省实验室, 安徽合肥 230037;
3. 国防科技大学, 安徽合肥 230037)

摘要: 气溶胶沉降扩散主要研究气溶胶粒子在大气中的运动状态、浓度迁移、表面沉积过程。表征物理量主要包括气溶胶粒子沉降通量、沉降速度、浓度分布、扩散速度等。开展相关研究可以为气溶胶生成方式优化、消光效果评估与预测等提供科学依据。文中概括了三种气溶胶生成方式, 分析了气溶胶粒子在大气中沉降扩散过程机理, 阐述了气溶胶沉降与扩散特性参量计算、仿真模拟和试验测定方法。结合目前气溶胶沉降扩散研究面临的挑战, 对气溶胶沉降扩散理论分析、数值模拟、试验研究与综合运用进行了展望。

关键词: 气溶胶; 沉降; 扩散; 仿真模型; 计算方法

中图分类号: O433.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220313

Research progress on the deposition and diffusion of aerosols (*invited*)

Gu Youlin^{1,2,3}, Chen Guolong^{1,3}, Hu Yihua^{1,2,3}, He Haihao^{1,3}, Ding Wanying^{1,3}, Cao Hao^{1,3}

- (1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;
2. Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, China;
3. National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: Aerosol deposition and diffusion mainly study the motion state, concentration migration and surface deposition process of aerosol particles in the atmosphere. The physical parameters mainly include the deposition flux, deposition velocity, concentration distribution and diffusion velocity of aerosol particles. Relevant research can provide a scientific basis for the optimization of aerosol generation and the evaluation and prediction of extinction effects. In this paper, three major methods for the generation of aerosols were summarized, the mechanism of aerosol particles settling and diffusing in the atmosphere was analysed, and the calculation, simulation and experimental measurement methods of aerosol settling and diffusing characteristic parameters were expounded. In view of the challenges in the study of aerosol deposition and diffusion, perspectives on future theoretical analyses, numerical simulations, experimental research and comprehensive applications are provided.

Key words: aerosol; deposition; diffusion; simulation model; calculation method

收稿日期: 2022-05-07; 修订日期: 2022-06-14

基金项目: 国家自然科学基金 (62075241); 先进激光技术安徽省实验室基金 (20191003)

作者简介: 顾有林, 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光电信息处理方面的研究。

0 引言

气溶胶粒子是指悬浮在气体中的固体或液体颗粒,其尺度范围为1 nm~100 μm ^[1],包括各种扬尘沙粒、燃烧产物、金属粉末、无机盐微粒、有机颗粒物、微生物颗粒、放射性核素^[2]等。气溶胶粒子因吸收与散射可见光、红外及其他波段的电磁波而具有消光特性。气溶胶颗粒物作为一种烟幕材料,近年来,对其消光性能的研究较为充分^[3-4],但对其实际使用过程中沉降扩散特性及消光效果的研究相对较少。研究气溶胶生成方式及其在大气中沉降扩散过程,对气溶胶的消光效果评估、生成方式方法优化以及新型气溶胶颗粒物研制均具有重要意义。气溶胶颗粒物释放到空气中,在释放动能和大气湍流的作用下,迅速分散形成初始云团,其气溶胶粒子具有一定空间分布。近年来,气溶胶试验测量技术取得较大进步,数值模拟仿真方法不断发展,气溶胶粒子浓度分布、沉降速度、沉降通量等参数获取能力和表征的精度有所提升,有力推动了气溶胶沉降扩散规律系统、深入地研究。文中从气溶胶生成方式对初始分散的影响、气溶胶沉降扩散过程机理、计算仿真与试验验证等方面简要回顾了气溶胶沉降扩散的研究现状,分析了研究中遇到的问题挑战与发展趋势,以期对气溶胶沉降扩散深入研究与实际应用提供有益参考。

1 气溶胶生成方式

气溶胶按人为释放的生成方式不同可大体分为压力喷洒型、爆炸分散型、燃烧释放型三类,其初始云团的输运分散过程及消光效果有所不同。

1.1 压力喷洒型

压力喷洒型主要指颗粒物通过地面或车载平台装置中压力喷洒形成的气溶胶。蒋云等^[5]在纳米复合干扰发烟剂中混合流散剂显著提高了发烟剂的流动性和喷流性,通过气流喷洒装置将其分散到空气中,能形成稳定的气溶胶,具有良好的分散性和漂浮性。任浩亮等^[6]研究了不同喷射条件对气溶胶消光区域的影响,研究发现消光区呈类锥形分布,随着粒子喷射流量的增加,下游消光区由团状变得连续,消光效果得以提升;提高射流喷射压力可以增加消光范围,但压力过高也会导致局部消光效果下降。刘国生

等^[7]研究了颗粒物撞击喷洒过程中的扩散特性,发现颗粒物射流碰撞后发生转向,以近似球顶锥体的形态扩散;气溶胶浓度的极大值集中在射流及碰撞区,其他区域浓度梯度随高度增加迅速减小。

1.2 爆炸分散型

爆炸分散型主要指材料通过爆炸产生的爆炸动能分散形成的气溶胶云团。刘志龙等^[8]研究了短切碳纤维爆炸分散过程,通过对高速相机拍摄的序列图像进行分析,将其过程分为壳体破裂、射流喷出、云团膨胀和湍流混合四个阶段,发现初始云团直径分别与弹体直径、碳纤维装填量的三次方根呈线性关系,初始云团高度与弹体高度呈二次多项式关系。郭爱强等^[9]采用了五帧差分法对红外烟幕弹爆炸分散红外视频进行分析,发现爆炸瞬间消光面积迅速增加,水平沿风速方向的气溶胶前沿扩散速度达到了126 m/s,垂直方向气溶胶前沿扩散速度达到了146.3 m/s。陈浩等^[10]基于Truegrid与Autodyn混合仿真爆轰压力,采用欧拉法对初始云团进行了数值计算,通过高速摄像法试验验证,得出气溶胶初始云团最大半径约3 m。

1.3 燃烧释放型

燃烧释放型主要指通过发烟剂燃烧作用释放形成的气溶胶,其具有颗粒粒径小、分散较均匀、悬浮时间长等特点。刘清海等^[11]通过对某燃烧型军用发烟剂生成的气溶胶主要成分进行独立并行三通道采样分析,推测其固体颗粒物的主要成分为 ZnCl_2 、 Al_2O_3 、 ZnO 和C等。保石等^[12]对比分析了几种燃烧释放型炭黑气溶胶的生成特性与发烟剂化合物含碳量、燃烧速度及温度的关系,验证了其中、远红外波段良好消光性能。张帅等^[13]研究了爆炸分散与燃烧释放组合情况下赤磷烟幕弹烟雾颗粒气溶胶的生成和扩散过程,发现烟幕弹爆炸后发烟片持续燃烧形成的气溶胶呈帘状。

气溶胶由于生成方式的不同,产生的初始云团具有不同颗粒成分、浓度分布与消光区域,其分散规律是研究气溶胶在大气中沉降扩散过程的重要前提。

2 沉降扩散机理分析

2.1 影响因素

气溶胶作为空气中分散的多相体系,大气环境、

气溶胶粒子、下垫面等因素对其沉降扩散均有影响。

2.1.1 大气环境

空气作为流体,其平流、湍流等动力学特性,以及温度梯度^[14]、湿度^[15]等会对气溶胶沉降扩散产生重要影响。有研究发现,大气稳定性相关因素一定程度上影响着建筑物及城区上空的气溶胶粒子的扩散^[16-18]。于潇萌等^[19]分析风速对单点源气溶胶扩散的影响,采用多相质点网格拉格朗日粒子追踪模型进行模拟,发现扩散范围及粒子最大抬升高度随风速增大而减小。Sofiev等^[20]评估了湍流热扩散对对流层低层气溶胶浓度垂直廓线的影响,发现湍流热扩散产生的向上的力对粗颗粒比细颗粒的影响更强。徐路程等^[21]通过数值模拟研究了风场对平坦开阔地域的气溶胶粒子扩散的影响,得到了其质量浓度的三维空间分布,发现在3~4 m/s的风速条件下消光效果最为理想。

2.1.2 气溶胶粒子

气溶胶粒子具有各种空间结构形状、粒径、密度、吸湿性、疏水性、碰撞凝聚等物理特性及化学反应特性,表现出不同的沉降扩散特性。气溶胶粒子粒径分布范围不同,其动力学性质有较大差异^[22]。并且气溶胶粒子粒径、密度等在扩散过程中因碰撞聚集,吸湿凝结等物理过程而发生改变,使小颗粒凝聚为大颗粒,受重力影响,加速沉降;或者与空气中其他物质发生反应,也会使性质发生较大变化。Li等^[23]研究了亚微米粒子粒径、温度、粒子初速对水平分散度的影响,发现在空气阻力、布朗力、Saffman升力、热泳力作用下,水平分散度随粒径的减小、热源温度的升高、初速的降低而增大。陈曦等^[24]利用团簇-团簇凝聚模型模拟了生物凝聚粒子的空间结构,计算并分析了不同空间结构凝聚粒子的孔隙率和分形维数对沉降速度的影响。

2.1.3 下垫面

下垫面如植被、土壤或水面(冰、雪面)等相关特性会对气流、表面捕获过程产生影响,从而影响气溶胶粒子的沉降扩散。Price等^[25]通过热线风速仪研究植被特征、叶片性质对湍流的影响,结果表明,气溶胶粒子干沉降通量与斯托克斯数呈现正相关。Farmer等^[26]整理编制不同表面、不同粒径范围、不同试验地区的沉降速度文献测量数据表,分析发现粒径是颗粒干沉降的关键控制变量,小颗粒更容易受到布朗扩散

驱动的沉积过程影响,而大颗粒则更容易受到截流、撞击和重力沉降的影响。在撞击和拦截过程中,表面吸收的作用随着尺寸的增大而增大。

综上所述可知,大气、气溶胶粒子及下垫面特性是影响气溶胶沉降扩散的重要因素,且各因素对沉降扩散的影响存在着一定耦合关系。

2.2 沉降过程

气溶胶粒子的沉降按照是否与大气降水过程有关可分为干沉降与湿沉降。

2.2.1 干沉降

干沉降主要指在气溶胶扩散过程中,在重力沉降、布朗扩散、湍流扩散、热泳^[27]、扩散泳、静电吸引等作用被表面捕获沉积过程^[28],分为重力和阻力作用下,向地表粘滞层的湍流扩散输送,再由粘滞层向表面进一步扩散,最后被表面捕获等三步^[29]。大气中气溶胶粒子的干沉降速度可以通过计算得到,也可通过试验测得地表沉降通量与大气中气溶胶粒子浓度的比值得到^[29-30]。Li等^[31]研究了低雷诺数湍流水平流动中多分散微米级颗粒的扩散沉积机理。结果表明,在低雷诺数湍流流场,重力对大颗粒的沉降起主要作用。对于小颗粒,沉降主要由湍流和布朗运动决定。黄宝银等^[32]研究了絮状颗粒结构生物气溶胶沉降,发现在一定大气条件下,特定结构絮状生物颗粒沉降速度较等体积球颗粒沉降速度降低了50%。

2.2.2 湿沉降

湿沉降指与大气降水有关的沉降过程^[33],可分为两个方面:一是云内凝并,即气溶胶颗粒作为凝结核,与水汽结合,或直接被云水捕获;二是云下清除,即雨水冲刷作用,将气溶胶颗粒带向地表沉降^[34]。在湿沉降的情况下,气溶胶粒子通常通过布朗扩散、惯性冲击、扩散泳动、热泳动和电荷效应被雨水清除^[34-36]。Zhao^[37]等提出了一种蒙特卡罗方法求解气溶胶湿法去除的一般动力学方程,研究发现降雨强度的增加有利于清除任意粒径的气溶胶。Chate等^[38]研究了雷暴雨天云下清除作用,发现布朗扩散能有效收集粒径小于0.1 μm 的气溶胶粒子,惯性冲击能有效收集粒径大于2 μm 的气溶胶粒子,而粒径为0.1~2 μm 的气溶胶粒子难以被有效收集。

2.3 沉降扩散机制

气溶胶粒子的扩散指粒子由高浓度区域向低浓

度区域迁移的过程,也可看作气溶胶粒子与空气介质的两相流动^[39]。

2.3.1 扩散输运理论

目前可用于气溶胶粒子扩散过程研究的主要观点包括莫宁-奥尔霍夫相似性理论 (Monin-Obukhov similarity theory, MOST), 梯度输送理论, 以及统计理论。

MOST 是大气边界层研究的重要解决方案, 它为分层大气提供了理想的边界条件^[40]。该理论假设流场水平均匀, 流场的特征廓线仅在垂直方向发生变化, 且垂直通量为恒定值。Tsang 等^[41] 使用 MOST, 研究了环境温度、大气条件和粒径对柴油烟雾的影响, 获得垂直方向风速和扩散率的平均值。贾文星等^[42] 研究了 MOST 在稳定边界层湍流扩散数值模拟应用时的偏差问题, 发现基于混合长理论得到的湍流扩散系数, 应用于夜晚稳定边界层大气中的湍流扩散数值模拟, 可使偏差得到改善。

梯度输送理论基于菲克定律, 原苏联科学家拉赫特曼进一步提出在大气湍流扩散作用下, 气溶胶颗粒浓度分布的拉赫特曼方程。李乐等^[43] 运用拉赫特曼扩散方程, 研究生物气溶胶粒子扩散过程, 发现参考点高度的气溶胶粒子浓度的最大值随时间不断减小, 风速越大, 地面粗糙度越高, 气溶胶粒子扩散速率越大。

统计理论假设大气气象条件及气溶胶粒子属性, 以及空间浓度符合某种分布, 通常采取正态分布的假设进行计算。

以上扩散输运理论观点基于一定的假设前提, 但由于大气运动的复杂性, 很多条件不能得到满足, 实际运用时, 通常需要考虑实际情况进行简化修正、对比分析以及试验验证。

2.3.2 扩散系数的计算

扩散系数是气溶胶粒子扩散过程中的重要参数。一方面在已知大气动力粘度和气溶胶粒径等参数的情况下, 可采取斯托克斯-爱因斯坦公式计算扩散系数, 进而根据菲克扩散定律得到布朗扩散的浓度分布。另一方面可以通过大气稳定性和不同尺度的气象条件来计算扩散系数, 通常有三种方案^[44-45]: 一是利用常规气象数据 (如大气稳定性和风速), 使用经验性的幂律公式; 二是利用水平和垂直风向标准差等

特殊气象数据得到的统计参数进行计算; 三是根据相似理论进行估算。Essa 等^[46] 提出了一种基于源距的湍流不稳定体涡流扩散系数计算方法。Korovina 等^[47] 通过试验研究了气溶胶粒子在密闭空间中有效扩散系数, 分析结果与气溶胶扩散数值模型计算的结果基本一致。

2.3.3 扩散特征的描述

气溶胶粒子的扩散造成了气溶胶粒子浓度在空间和时间上的分布变化, 导致的消光效果可以通过朗伯比尔定律进行计算。蒋云等^[48] 进一步研究了烟幕扩散模型中电磁波入射方向改变时气溶胶粒子浓度变化, 推导了三维坐标系变换矩阵和二维积分浓度投影算法。何友金等^[49] 利用分形布朗理论模型与烟幕中浓度点随机位移法模拟爆炸式干扰烟幕扩散过程。Zhu 等^[50] 采用梯度输送理论菲克扩散方程研究了气溶胶灭火剂有效浓度随扩散系数和扩散时间的变化规律。结果表明, 均匀扩散时间不取决于封闭房间的形状, 而取决于房间的总体积及其扩散源的位置。

从沉降与扩散对气溶胶粒子在大气中的运动与浓度分布的作用看, 两者处于一个相互影响的动态过程。如气溶胶粒子向下垫面的沉积或沉淀, 以及下垫面的部分反射作用, 影响着大气中气溶胶总颗粒数与其浓度分布, 而颗粒物沉积后的二次悬浮扩散也可导致沉降通量的反向变化。重力沉降作用时刻影响扩散的动态过程, 一般对于粒径大于 $10\ \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子作用更为明显, 使得点源释放的气溶胶沉降扩散表现为倾斜烟云模式, 由于地面或大气混合层顶的影响, 表现为部分反射的倾斜烟云^[51]。谷清等^[52] 采用虚点源后置法, 在点源的部分反射倾斜烟云模式基础上, 研究面源颗粒物沉降扩散模式, 提出风速小于 $1\ \text{m/s}$ 时的沉降烟团模式, 风速大于 $1\ \text{m/s}$ 时的倾斜烟云模式, 以及长期平均浓度模式和计算修正方法。孙杜娟等^[53] 采用有限差分方法对粒子的运动方程和气溶胶平流扩散方程进行差分运算, 构建了重力作用下烟幕“沉降—扩散”联合动态数值模拟方法, 较好地模拟气溶胶的动态特征。

气溶胶沉降扩散的机理分析有力支撑了仿真模拟与试验验证的进行。但影响沉降扩散的主要因素随着环境条件的变化有所不同, 研究时, 相关参数的设定及试验数据的分析需结合气溶胶具体特性, 采用

合理适用的理论方法具体解决。

3 沉降扩散特性仿真

综合考虑大气传输过程中存在的平流风扩散、大气湍流扩散、源的释放作用、物化反应及沉降沉积影响的情况下,可以用大气传输方程描述气溶胶粒子的浓度变化^[54]。为了能够对沉降扩散过程进行计算、仿真和预测,各种参数化计算方案、程序、模型、软件得以开发运用。

3.1 沉降参数化计算

沉降的仿真体现于相关物理过程的参数化计算,采取基于斯托克斯定律的物理模型或基于试验数据的半经验模型得出沉降速度、沉降通量及其规律。

物理模型着重于平衡重力、浮力和阻力的作用,采用斯托克斯公式计算得到各种气溶胶粒子的重力沉降速度^[24,55],王玄玉等^[55]利用显微镜分析了几种石墨颗粒粒径及长宽比,发现石墨颗粒具有良好的扩散和悬浮性能,可形成稳定的气溶胶,颗粒平均粒径为 5.64 μm ,大气环境下的沉降速率为 0.002 12 m/s。

半经验模型进一步考虑了大气湍流、分子运动以及表面捕获机制,包括布朗扩散、碰撞、截留、反弹、热泳和扩散泳等因素影响,主要适用于特定地表表面和特定粒径段的计算。如 Slinn 模型^[56]采用阻力法,可用于各种植被冠层。Zhang 等^[57]结合干沉降经验参数对其应用扩展到 14 种地表类型,包括水面和冰面,得到广泛运用。Zhang 等^[58]考虑风力间歇性作用,采用拖动分割理论,得出颗粒沉降速度关于空气动力阻力、表面聚集阻力和重力阻力的函数表达式,经风洞测试验证,与气溶胶颗粒在均匀粗糙表面沉积

分布相符。Petroff 等^[59]参数化表征了布朗扩散、拦截和惯性撞击,湍流撞击,定义 26 种不同地表类型的沉积,并在水、冰和雪表面计算不同粒径气溶胶颗粒沉积时,将观测到的渗流效应速度纳入到漂移速度,显著增加了准确性。

物理模型基于一定的前提假设,半经验模型基于相关试验数据。受湍流边界层的复杂多变以及随机因素影响,模型预测结果与实测数据存在一定偏差。

3.2 扩散数值模拟仿真

扩散数值模拟仿真主要包括四类,分别为高斯模型、拉格朗日模型、欧拉模型以及拉格朗日-欧拉嵌套模型等^[60]。高斯模型假设垂直于风速方向上粒子浓度呈高斯分布。拉格朗日模型通过跟随粒子运动轨迹,描述浓度变化。欧拉模型使用控制体流体速度的统计特征来描述浓度扩散。拉格朗日-欧拉嵌套模型采用拉格朗日方法计算近源区的初始输运和扩散,采用欧拉方法计算远距离的输运和扩散,通过取长补短,弥补固有缺陷,优化模拟效果。不同模型具有各自的优缺点,如精度、适用尺度范围和环境条件等(表 1)。并有部分学者对模型性能展开了进一步的分析,曹博等^[61]基于贝叶斯马尔可夫链蒙特卡罗方法,分析了高斯羽流模型的不确定性,通过计算发现观测误差对置信区间的影响较大。Ul Haq 等^[62]通过野外示踪试验,对三维拉格朗日粒子扩散模型 LAPMOD 的中尺度应用进行评估,发现该模型用于复杂地形的短期近场模拟与试验观测数据较为吻合。

研究气溶胶扩散时应根据具体情况选用相应合理的模拟方法及模型进行修正优化,增强仿真效果。例如, Mészáros 等^[63]使用全球尺度拉格朗日粒子模

表 1 不同气溶胶扩散仿真模型比较

Tab.1 Comparison of different simulating models for aerosol diffusion

Simulation mode	Data support	Computational complexity	Scale range	Accuracy	Environmental conditions
Gauss model	Wind speed	Simple (fast operation, stable result)	Short time, distance less than 10 km	Low	Open and flat terrain; stable atmosphere
Lagrange model	Real-time detailed meteorological data	Complex (solving the particles motion equation)	Full scale	High	Complex terrain; various atmospheric stability conditions
Euler model	Different scales of meteorological data	Complex (solving the concentration equation)	Medium and long distances	High	Complex terrain; various atmospheric stability conditions
Lagrange-Euler nested mode	Different scales of meteorological data	Complex	Full scale	High	Complex terrain; various atmospheric stability conditions

型 (IMS 和 RAPTOR) 对福岛事故的全球扩散进行数值模拟, 结果表明, 日本福岛事故可在 10 天至 1 个月内显著影响欧洲、北美、亚洲等地区放射性核物质的大气浓度。Luhar^[64] 通过使用概率密度函数来描述观测到的垂直湍流速度偏差, 对高斯烟团模型进行修正, 在对微风条件下气溶胶粒子的扩散模拟中发现与拉格朗日粒子模式预测结果较为一致, 但由于实际风向分布的非高斯性, 模型的有效性还需要验证。孙逊等^[65] 采用数学形态学算法实时检测烟幕视频边缘数据, 实时修正随机游走烟幕仿真模型, 在进行的烟幕试验中, 实现了复杂大气条件下烟幕沉降扩散的精确化仿真。

3.3 仿真软件

采用计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 方法对气溶胶烟幕扩散进行仿真, 通常首先适当设置网格分辨率、边界条件和湍流模型, 而后通过求解网格纳维-斯托克斯 (Navier-Stokes, N-S) 方程, 得到复杂的微尺度风场和湍流场。CFD 方法适用于扩散源近距离范围的模拟, 一般计算成本较高, 为提高计算效率, 可以结合实际情况进行改进, 如 Jacob 等^[66] 通过模拟中尺度和城市微尺度大气流中扩散过程, 发现基于网格玻耳兹曼方法的大涡模拟方法与基于 N-S 方程的经典方法相比能显著提高计算效率。CFD 一般有三种方程离散方法: 有限体积法、有限差分法和有限元法。湍流的计算主要采用直接数值模拟、大涡模拟、雷诺平均等方法^[67]。Xu 等^[68] 利用 CFD 程序 PHOENICS 研究了集装箱船废气排放的烟羽扩散, 定量分析了不同烟囱数量下污染物的质量分数和烟羽高度。肖凯涛等^[69] 利用 Unity 3D 软件建立扩散模型, 在非结构网格中模拟气溶胶颗粒的湍流运动轨迹。

目前用于气溶胶烟幕扩散研究的 CFD 软件中, 商业软件 Fluent 和开源软件 OpenFOAM 较为通用。例如, 何帆等^[70] 使用 Fluent 对警用催泪烟幕扩散进行流场数值计算, 得到风速对催泪烟幕浓度的影响规律。Wang 等^[71] 采用 Fluent 数值模拟, 研究某均匀推拉式通风系统对油漆喷涂过程中漆雾颗粒扩散的影响, 发现漆雾颗粒的扩散程度随着气幕射流速度的增大而增大, 而随着送风速度的增大而减小。夏雨婷^[72] 采用 OpenFOAM 软件不同湍流模型研究了核电厂大

气污染物的浓度分布规律, 发现 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型的计算结果与风洞试验结果最为接近, 模拟准确性最高。

不同软件具有各自优缺点, 如 OpenFOAM 具有面向对象、多物理模块添加方便等优点, 但存在涉化学反应方程求解、混合输运模型过于简化等不足^[73]。进行气溶胶扩散仿真研究, 应结合实际情况选用合适的软件, 并对其自带的相关模型进行修正。例如, Longest 等^[74] 提出了对 Fluent 中计算层流气溶胶粒子布朗运动模型进行湍流修正, 得到改进的布朗力模型。Chen 等^[75] 通过在 Fluent 中使用用户定义函数重写布朗扩散系数和粒子积分时间步长来修正布朗力, 较好模拟超细气溶胶粒子通过建筑裂缝的扩散。

数值模拟仿真作为一种重要方法, 能够为气溶胶沉降扩散过程分析研究提供有力支撑。但真实大气存在各种随机因素难以量化表征, 数值模拟仿真模型软件并不完备, 得到的结果应进一步通过试验验证。

4 沉降扩散试验验证

气溶胶沉降扩散试验验证主要包括实验室试验和野外大气环境试验。

4.1 测量技术

试验中相关数据的测量应结合实际需要和环境条件选择合适的测量方式方法。(1) 采用气溶胶粒径谱仪测量一定粒径范围扩散粒子的粒径谱, 也可使用几台不同仪器 (如串联式多级采样器、空气动力学粒径谱分布仪和扫描电迁移率颗粒物粒径谱仪) 进行联合测量, 增加粒径谱测量范围和相关参量^[76]; (2) 采用粒子图像测速法、粒子动力学分析法、光电管超速法、粒子跟踪测速法、高速摄影法等测量气溶胶的扩散速度^[77]; (3) 采用收集分离称重法直接测量气溶胶粒子沉降通量^[78], 也可采取示踪法、基于不同垂直高度的气溶胶粒子浓度差的梯度法测量, 还可采用涡度相关 (Eddy Covariance) 和松弛涡旋累积 (Relaxed Eddy Accumulation, REA) 等方法^[79-80], 使用光学颗粒计数器^[81] 或粒子光谱仪等仪器设备进行具有粒径分辨的测量^[82], 使用气溶胶质谱仪可得到具有化学分辨的测量^[83]。

4.2 实验室试验

实验室试验因条件可控, 数据采集方便, 可多次

重复而广泛用于气溶胶粒子沉降扩散规律^[84]和数值仿真模型的验证研究。实验室中常采用烟幕箱和风洞等形式。例如,刘清海等^[85]通过烟幕箱试验研究了石墨烯气溶胶沉降过程,分析发现石墨烯因片层薄、密度小,沉降速度较低,具有较好的悬浮性能。Roupsard 等^[86]在风洞中测量了不同风速条件下,亚微米气溶胶粒子在玻璃、水泥面和草地水平和垂直表面的沉降速度及相关的湍流参数。发现沉积速度受撞击和截留作用的影响,随湍流强度的增加而增加。Yang 等^[87]通过风洞试验,采用粒子图像测速法研究了沙粒气溶胶的扩散,分析发现水平扩散速度随风速的增大而增大,随粒径的增大而减小。

4.3 野外大气环境试验

野外大气环境试验能够克服实验室烟幕箱或风洞试验空间有限、壁面干扰的影响,接近真实使用场景,随机因素多,既可以试验气溶胶粒子沉降扩散特定参数,又可以直观评估气溶胶的总体消光性能,通常作为检验和评估气溶胶沉降扩散的最终手段。但存在测量结果局限于特定的气象条件和地形环境,且在各种随机因素影响下,测量结果难以直接进行对比分析等不足。Petroff 等^[88]通过四周的气溶胶通量测量研究发现,某温带阔叶林上空各粒径气溶胶沉积量随着叶面积指数的降低而减少。Pellerin 等^[89]采用涡度相关法,测量了粒径在 2.5 nm~1.2 μm 之间的放射性核素气溶胶颗粒在玉米地、草地、裸露土壤和森林等表面的干沉降速度。分析了风的摩擦速度、地表感热通量和大气稳定性及表面特性的影响。GRÖNHOLM 等^[90]采用 REA 方法,以 5~10 nm 步长测量了 10~150 nm 粒径范围内气溶胶颗粒的沉积速度。

沉降扩散试验通过对相关物理量的直接测量,数据相对可信度高,但过程复杂、成本高昂,特定现实场景如核素扩散、应急预测等研究往往不具备试验条件。

5 总结与展望

近年来,气溶胶的生成方式、沉降扩散规律和仿真模拟、试验验证等方面研究取得了诸多成就,但依然面临一些挑战和不确定性。

(1) 沉降扩散解析有待精确化

气溶胶沉降扩散机理研究提升了对其输运过程及其影响因素的认识。由于湍流的复杂性,大气微气

象条件、表面沉降微物理过程的随机因素影响,使得气溶胶沉降扩散过程难以解析。目前采用的半经验方案大多基于空气动力学,综合考虑各方面作用因素,使用经验参数和公式能够对其过程特点规律进行一定的描述和计算,但也存在对条件的假设和简化。如何分析气溶胶真正状态和沉降扩散真实过程还需做进一步理论研究。

(2) 数值模拟参数有待精细化

数值模拟仿真创新发展,如模型嵌套及 CFD 方法逐步实现了过程的详细模拟。仿真模型使用过程中对物理过程量化表征难以细化,相关参数敏感性分析较少,数值模拟结果只在特定条件下能够直接与试验数据进行验证,误差分析难以区分模型参数偏差与试验中偶然因素的影响,制约了对仿真模型的改进优化。现有模型中同时考虑沉降扩散联合动态和表面沉降与再悬浮等复杂过程的不多,未来需要更精确的综合模型,以实现与试验数据的直接验证。

(3) 检验手段有待标准化

多种测量技术的运用有力促进了气溶胶沉降扩散试验的开展。真实大气中影响气溶胶沉降扩散的因素复杂多变,试验测试可重复性差、成本高、数据采集量大,难以对微尺度数据进行准确测量和实时记录,基于大量试验进行性能评价性价比低,有必要对人工释放颗粒物气溶胶的沉降扩散性能评测试验与评价标准进行合理明确。以往部分试验中,物理量测量相对简单,环境条件及测量方法的不同导致试验数据存在差异,对比分析不易,可进一步通过标准统一的试验、立体全面的测量,以建立相对完备的数据集。

随着传感器技术的进步、计算机处理速度的提升,大尺度、高精度、多参数测量与数据实时处理分析方面将取得突破,以及人工智能科技在气溶胶沉降扩散研究中的发展运用,将为各类气溶胶生成材料综合性能评价和改性优化提供重要参考,并促进气溶胶生成技术不断创新发展,如利用无人机抛撒气溶胶颗粒生成方式或将得到广泛应用。与此同时,基于试验及监测数据的气溶胶沉降扩散大数据分析处理及在污染防治、气象预报、公共卫生、核化事故应急处理等领域的综合运用将成为气溶胶沉降扩散研究的重要工作。

综上所述,今后一段时期,气溶胶沉降扩散解析

精确化、数据模拟参数精细化、试验检测手段标准化、试验数据智能化分析与综合运用将持续成为气溶胶沉降扩散研究的热点。

参考文献:

- [1] Fröhlich-Nowoisky J, Kampf C J, Weber B, et al. Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem interactions [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 182: 346-376.
- [2] Aba A, Al-Dousari A M, Ismaeel A. Depositional characteristics of ^{7}Be and ^{210}Pb in Kuwaiti dust [J]. *Journal of Radio Analytical and Nuclear Chemistry*, 2015, 307(1): 15-23.
- [3] Wang Xuanyu. Development of anti-infrared smoke material and its extinction performance (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20201019. (in Chinese)
- [4] Gu Youlin, Lu Wei, Fang Jiajie, et al. Research progress on artificially prepared infrared extinction materials and their extinction properties (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20201018. (in Chinese)
- [5] Jiang Yun, Dai Xiaodong, Liu Qinghai, et al. Improving flowability and floodability of ultrafine powder smoke agent [J]. *China Powder Science and Technology*, 2019, 25(5): 33-38. (in Chinese)
- [6] Ren Haoliang, Zhang Jianchao, Cheng Huichuan. Effects of jet conditions on aerosol smoke distribution [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(16): 6746-6751. (in Chinese)
- [7] Liu Guosheng, Guan Hua, Song Dongming, et al. Application of DSMC method to study the impact diffusion characteristics of smoke particles [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2014, 32(3): 395-399. (in Chinese)
- [8] Liu Zhilong, Wang Xuanyu, Yao Weizhao, et al. Experimental study on explosive dispersion characteristics and variation laws of cloud parameters of short carbon fibers [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2019, 27(9): 773-778. (in Chinese)
- [9] Guo Aiqiang, Gao Xinbao, Li Tianpeng, et al. Five-frame difference method for extracting characteristic parameters from measured infrared smoke screen Images [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2021, 29(12): 1144-1151. (in Chinese)
- [10] Chen Hao, Gao Xinbao, Li Tianpeng, et al. Numerical simulation of maximum radius of initial cloud cluster of smoke screen [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2018, 26(10): 820-827. (in Chinese)
- [11] Liu Qinghai, Zhao Wenbo, Peng Wenlian, et al. Component analysis of smokescreen combusting from a smoke agent [J]. *China Measurement & Test*, 2020, 46(9): 59-63. (in Chinese)
- [12] Bao Shi, Zhou Ye, Zhang Zihao, et al. Research on infrared smoke obscuring performance of burnable carbon black [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2013, 28(5): 85-88. (in Chinese)
- [13] Zhang Shuai, Fu Debin, Zhu Xijuan. Simulation of smoke bomb particle generation and diffusion state based on combined method [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, 41(1): 33-37. (in Chinese)
- [14] Issakhov A, Mashenkova A. Numerical study for the assessment of pollutant dispersion from a thermal power plant under the different temperature regimes [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 16(10): 6089-6112.
- [15] Chen L, Peng S, Liu J, et al. Dry deposition velocity of total suspended particles and meteorological influence in four locations in Guangzhou, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(4): 632-639.
- [16] Jeong S J, Kim A R. CFD study on the influence of atmospheric stability on near-field pollutant dispersion from rooftop emissions [J]. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2018, 12(1): 47-58.
- [17] Bazdidi-Tehrani F, Gholamalipour P, Kiamansouri M, et al. Large eddy simulation of thermal stratification effect on convective and turbulent diffusion fluxes concerning gaseous pollutant dispersion around a high-rise model building [J]. *Journal of Building Performance Simulation*, 2018, 12(1): 97-116.
- [18] Guo D, Zhao P, Wang R, et al. Numerical simulations of the flow field and pollutant dispersion in an idealized urban area under different atmospheric stability conditions [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 136: 310-323.
- [19] Yu Xiaomeng, Cao Le, Yan Jiade, et al. A simulation of atmospheric pollution based on multi-phase particle-in-cell method [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(14): 5856-5863. (in Chinese)
- [20] Sofieva M, Sofieva V, Elperin T, et al. Turbulent diffusion and turbulent thermal diffusion of aerosols in stratified atmospheric flows [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: D18.
- [21] Xu Lucheng, Xiao Kaitao. CFD-based study on countermeasure performance of anti-infrared smoke screen [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(4): 337-341. (in Chinese)
- [22] Yue D L, Hu M, Wu Z J, et al. Variation of particle number size distributions and chemical compositions at the urban and downwind regional sites in the Pearl River Delta during

- summertime pollution episodes [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(19): 9431-9439.
- [23] Li C, Wang H, Yu C W, et al. Diffusion characteristics of the industrial submicron particle under Brownian motion and turbulent diffusion [J]. *Indoor and Built Environment*, 2021, 31(1): 17-30.
- [24] Chen Xi, Hu Yihua, Gu Youlin, et al. Atmospheric suspension settling characteristics of biological extinction material [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 0521003. (in Chinese)
- [25] Price T A, Stoll R, Veranth J M, et al. A wind-tunnel study of the effect of turbulence on PM10 deposition onto vegetation [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 159: 117-125.
- [26] Farmer D K, Boedicker E K, Debolt H M. Dry deposition of atmospheric aerosols: Approaches, observations, and mechanisms [J]. *Annu Rev Phys Chem*, 2021, 72: 375-397.
- [27] Han S, Li Y, Wen G, et al. Study on thermophoretic deposition of micron-sized aerosol particles by direct numerical simulation and experiments [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2022, 233: 113316.
- [28] Maro D, Connan O, Flori J P, et al. Aerosol dry deposition in the urban environment: Assessment of deposition velocity on building facades [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2014, 69: 113-131.
- [29] Lin Guanming, Cai Xuhui, Hu Min, et al. An overview of atmospheric aerosol dry deposition[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(9): 3211-3220. (in Chinese)
- [30] Mohan S M. An overview of particulate dry deposition: measuring methods, deposition velocity and controlling factors [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, 13(1): 387-402.
- [31] Li Y, Gu W, Wang D, et al. Direct numerical simulation of polydisperse aerosol particles deposition in low Reynolds number turbulent flow [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2018, 121: 223-231.
- [32] Huang Baokun, Hu Yihua, Gu Youlin, et al. Aerodynamic property of artificial biological extinction material [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 0204005. (in Chinese)
- [33] Tai A Y, Chen L A, Wang X, et al. Atmospheric deposition of particles at a sensitive alpine lake: Size-segregated daily and annual fluxes from passive sampling techniques [J]. *Sci Total Environ*, 2017, 579: 1736-1744.
- [34] Chate D M, Rao P S P, Naik M S, et al. Scavenging of aerosols and their chemical species by rain [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(18): 2477-2484.
- [35] Santachiara G, Prodi F, Belosi F. Atmospheric aerosol scavenging processes and the role of thermo- and diffusio-phoretic forces [J]. *Atmospheric Research*, 2013, 128: 46-56.
- [36] Olszowski T. Concentration changes of PM10 under liquid precipitation conditions [J]. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 2015, 22(3): 363-378.
- [37] Zhao H, Zheng C. Monte Carlo solution of wet removal of aerosols by precipitation [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(8): 1510-1525.
- [38] Chate D M, Pranesha T S. Field studies of scavenging of aerosols by rain events [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2004, 35(6): 695-706.
- [39] Almohammed N, Alobaid F, Breuer M, et al. A comparative study on the influence of the gas flow rate on the hydrodynamics of a gas-solid spouted fluidized bed using Euler-Euler and Euler-Lagrange/DEM models [J]. *Powder Technology*, 2014, 264: 343-364.
- [40] Foken T. 50 Years of the Monin-Obukhov similarity theory [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 119(3): 431-447.
- [41] Tsang T T, Pai P, Korgaonkar N V. Effect of temperature, atmospheric condition, and particle size on extinction in a plume of volatile aerosol dispersed in the atmospheric surface layer [J]. *Appl Opt*, 1988, 27(3): 593-598.
- [42] Jia W, Zhang X, Zhang H, et al. Application of turbulent diffusion term of aerosols in mesoscale model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(11): 093199.
- [43] Li Le, Hu Yihua, Wang Xiao, et al. Diffusion characteristics of biological extinction material [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0621001. (in Chinese)
- [44] Mao S, Lang J, Chen T, et al. Comparison of the impacts of empirical power-law dispersion schemes on simulations of pollutant dispersion during different atmospheric conditions [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 224: 117317.
- [45] Pandey G, Sharan M. Performance evaluation of dispersion parameterization schemes in the plume simulation of FFT-07 diffusion experiment [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 172: 32-46.
- [46] Essa K S M, Embaby M. New formulations of eddy diffusivity for solution of diffusion equation in a convective boundary layer [J]. *Atmospheric Research*, 2007, 85(1): 77-83.
- [47] Kuznetsov G V, Korovina N V, Zharova I K, et al. Diffusion coefficient when fine aerosol media propagate in a confined volume [J]. *EPJ Web of Conferences*, 2016, 110: 01029.
- [48] Jiang Yun, Li Wei, Song Weiwei, et al. Calculating the transmission rate of electromagnetic wave along any light-path

- in smoke diffusion model [J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(1): 95-99. (in Chinese)
- [49] He Youjin, Lv Yuan, Tan Wei. Research on smoke simulation with fractional brownian motion [J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(11): 660-663. (in Chinese)
- [50] Zhu C G, Lü C X, Wang J. Evaluation of aerosol fire extinguishing agent using a simple diffusion model [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 2012(10): 587-612.
- [51] Ma Fujian. A gaussian plume diffusion-deposition model [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 1986(2): 59-67. (in Chinese)
- [52] Gu Qing, Yang Xinxing, Li Yunsheng. Calculating method for area source model of particulates [J]. *Strategic Study of CAE*, 2005(1): 41-44. (in Chinese)
- [53] Sun Dujuan, Hu Yihua, Li Le. Numerical simulation of aerosol sedimentation and diffusion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 449-453. (in Chinese)
- [54] Leelőssy Á, Mona T, Mészáros R, et al. Eulerian and Lagrangian approaches for modelling of air quality [C]//Mathematical Problems in Meteorological Modelling. Mathematics in Industry, 2016, 24: 73-85.
- [55] Wang Xuanyu, Dong Wenjie, Pang Minhui, et al. Granular characteristics and infrared extinction coefficients of graphite aerosol [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 102: 1238-1244.
- [56] Slinn W G N. Prediction for particle deposition to vegetative canopies [J]. *Atmospheric Environment*, 1982, 16(3): 1785-1794.
- [57] Zhang L, Gong S, Padro J, et al. A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(3): 549-560.
- [58] Zhang J, Shao Y. A new parameterization of particle dry deposition over rough surfaces [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(22): 12429-12440.
- [59] Petroff A, Zhang L. Development and validation of a size-resolved particle dry deposition scheme for application in aerosol transport models [J]. *Geoscientific Model Development*, 2010, 3(2): 753-769.
- [60] Leelőssy A, Lagzi I, Kovacs A, et al. A review of numerical models to predict the atmospheric dispersion of radionuclides [J]. *J Environ Radioact*, 2018, 182: 20-33.
- [61] Cao B, Cui W, Chen C, et al. Development and uncertainty analysis of radionuclide atmospheric dispersion modeling codes based on Gaussian plume model [J]. *Energy*, 2020, 194: 116925.
- [62] Ul Haq A, Nadeem Q, Farooq A, et al. Assessment of Lagrangian particle dispersion model "LAPMOD" through short range field tracer test in complex terrain [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2019, 205: 34-41.
- [63] Meszaros R, Leelőssy A, Kovacs T, et al. Predictability of the dispersion of Fukushima-derived radionuclides and their homogenization in the atmosphere [J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 19915.
- [64] Luhan A K. Analytical puff modelling of light-wind dispersion in stable and unstable conditions [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(2): 357-368.
- [65] Sun Xun, Wang Xuanyu, Wang Xian, et al. Random-walk smokescreen simulation model of real-time correction [J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(9): 1979-1984. (in Chinese)
- [66] Jacob J, Merlier L, Marlow F, et al. Lattice Boltzmann method-based simulations of pollutant dispersion and urban physics [J]. *Atmosphere*, 2021, 12(7): 833.
- [67] Flores F, Garreaud R, Muñoz R C. CFD simulations of turbulent buoyant atmospheric flows over complex geometry: Solver development in OpenFOAM [J]. *Computers & Fluids*, 2013, 82: 1-13.
- [68] Xu Y, Yu Q, Zhang Y, et al. Numerical study on the plume behavior of multiple stacks of container ships [J]. *Atmosphere*, 2021, 12(5): 600.
- [69] Xiao Kaitao, Xu Lucheng, Li Honghui. Implement of particle system in complex wind field and turbulence field [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2015, 39(2): 13-21. (in Chinese)
- [70] He Fan, He Kaikai, Huang Dong, et al. Analysis of the effect of wind on smoke spread properties of a type explosive tear-gas grenade [J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2016, 28(5): 25-29. (in Chinese)
- [71] Wang J, Huo Q, Zhang T, et al. Performance evaluation for a coupled push-pull ventilation and air curtain system to restrict pollutant dispersion in a factory building [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 43: 103164.
- [72] Xia Yuting. A comparative study of air pollutant diffusion models based on OpenFOAM [D]. Hengyang: University of South China, 2021. (in Chinese)
- [73] Yang Q, Zhao P, Ge H. reactingFoam-SCI: An open source CFD platform for reacting flow simulation [J]. *Computers & Fluids*, 2019, 190: 114-127.
- [74] Longest P W, Xi J. Effectiveness of direct Lagrangian tracking models for simulating nanoparticle deposition in the upper airways [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2007, 41(4): 380-397.
- [75] Chen C, Zhao B. A modified Brownian force for ultrafine

- particle penetration through building crack modeling [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 170: 143-148.
- [76] Meier J, Wehner B, Massling A, et al. Hygroscopic growth of urban aerosol particles in Beijing (China) during wintertime: A comparison of three experimental methods[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(18): 6865-6880.
- [77] Dong Zhibao, Qian Guangqiang, Luo Wanyin, et al. Measuring the velocity of particles in an aeolian saltation cloud: A comparison of several commonly used methods [J]. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(4): 749-757. (in Chinese)
- [78] Lyman S N, Gustin M S, Prestbo E M, et al. Testing and application of surrogate surfaces for understanding potential gaseous oxidized mercury dry deposition [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(16): 6235-6241.
- [79] Pryor S C, Larsen S E, Sorensen L L, et al. Particle fluxes above forests: observations, methodological considerations and method comparisons [J]. *Environ Pollut*, 2008, 152(3): 667-78.
- [80] Pryor S C, Larsen S E, Sørensen L L, et al. Particle fluxes over forests: Analyses of flux methods and functional dependencies [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(D7): D07205.
- [81] Lavi A, Farmer D K, Segre E, et al. Fluxes of fine particles over a semi-arid pine forest: Possible effects of a complex terrain [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2013, 47(8): 906-915.
- [82] Ahlm L, Krejci R, Nilsson E D, et al. Emission and dry deposition of accumulation mode particles in the Amazon Basin [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(21): 10237-10253.
- [83] Farmer D K, Kimmel J R, Phillips G, et al. Eddy covariance measurements with high-resolution time-of-flight aerosol mass spectrometry: A new approach to chemically resolved aerosol fluxes [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(6): 1275-1289.
- [84] Wang J Y, Meng Q H, Luo B, et al. A multiple-fan active control wind tunnel for outdoor wind speed and direction simulation [J]. *Rev Sci Instrum*, 2018, 89(3): 035108.
- [85] Liu Qinghai, Liu Haifeng, Dai Xiaodong, et al. Infrared interfering performance of graphene smoke screen [J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(11): 1071-1076. (in Chinese)
- [86] Rouspard P, Amielh M, Maro D, et al. Measurement in a wind tunnel of dry deposition velocities of submicron aerosol with associated turbulence onto rough and smooth urban surfaces [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2013, 55: 12-24.
- [87] Yang P, Dong Z, Qian G, et al. Height profile of the mean velocity of an aeolian saltating cloud: Wind tunnel measurements by particle image velocimetry [J]. *Geomorphology*, 2007, 89(3-4): 320-334.
- [88] Petroff A, Murphy J G, Thomas S C, et al. Size-resolved aerosol fluxes above a temperate broadleaf forest [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 190: 359-375.
- [89] Pellerin G, Maro D, Damay P, et al. Aerosol particle dry deposition velocity above natural surfaces: Quantification according to the particles diameter [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2017, 114: 107-117.
- [90] Grönholm T, Aalto P P, Hiltunen V J, et al. Measurements of aerosol particle dry deposition velocity using the relaxed eddy accumulation technique [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2007, 59(3): 381-386.