

亚微米颗粒在汇作用下运动机理的实验研究¹⁾彭宁宁 刘志丰 王连泽²⁾

(清华大学航天航空学院流体力学所, 北京 100084)

摘要 当前, 城市空气质量的不断恶化, 引起了公众的普遍性关注. 空气中的悬浮颗粒物, 是城市大气环境重要污染源之一, 其分布、运动及扩散规律已成为科学领域的研究热点. 与连续流体不同, 大气中的悬浮颗粒物是离散的, 确定颗粒运动的模型是研究大气细颗粒物污染问题的关键. 本文拟研究小空间静稳空气中亚微米级颗粒在汇作用下的运动规律, 并构建其运动模型. 在密闭实验空间中通过燃烧生成亚微米颗粒, 利用静电吸附装置模拟颗粒汇, 并通过粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 实验和激光多普勒测速仪 (laser Doppler velocimeter, LDV) 实验技术测量分析不同空间内亚微米颗粒在大气中的热运动速度和在汇作用下的运动规律, 并推导出颗粒物的速度分布经验公式. 结果显示: 粒子在汇作用下的运动与连续流体汇运动规律类似, 但在小空间内颗粒的运动不满足流体连续方程; 说明在无气流夹带输运情况下, 利用汇作用及颗粒的扩散而发展的颗粒净化技术是可行的.

关键词 亚微米颗粒, 静电吸附, 颗粒汇, 激光多普勒测速, 粒子图像测速

中图分类号: X513 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-16-247

EXPERIMENTAL STUDY OF SUBMICRON PARTICLES' MOTION IN
THE EFFECT OF PARTICLE-SINK¹⁾Peng Ningning Liu Zhifeng Wang Lianze²⁾

(Institute of Fluid Mechanics, School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

Abstract As particulate air pollution has aroused the universal concern of the public, the motion and diffusion law as well as the distribution rule of suspended particles have become research focuses. The suspended particles in air are discrete which are different from continuum medium, and thus the model of particle motion are different from that of continuous fluid. To ascertain the model of particle motion is a critical issue in the research of ambient particulate matter. This paper concentrates on the movement of submicron particles in still air where the particle-sink exists. In this experimental study, submicron particles were generated by combustion, particle-sink was simulated through electrostatic adsorption device, and particles' movements at different intensities of particle-sinks were measured by PIV and LDV. The experimental results show that movements of particles in still air without sink are Brownian motion, and if there is a sink, particles move to the sink at variable velocities which varied inversely as the distance to the sink. It turns out that particles' movements around sink are analogous to that of continuum flow. Also, an empirical formula of particle's two-dimensional velocity distribution is given on the basis of PIV experimental data, which shows the motion of particle in small space does not satisfy the continuity equation. Meanwhile, experiments in a bigger space were performed by LDV

2016-09-05 收稿, 2016-12-05 录用, 2016-12-07 网络版发表.

1) 北京飞疆佳科技服务有限公司资助项目.

2) 王连泽, 副教授, 主要研究方向: 流体减阻, 工业粉尘清理, 颗粒聚团. E-mail: wanglz@tsinghua.edu.cn

引用格式: 彭宁宁, 刘志丰, 王连泽. 亚微米颗粒在汇作用下运动机理的实验研究. 力学学报, 2017, 49(2): 289-298

Peng Ningning, Liu Zhifeng, Wang Lianze. Experimental study of submicron particles' motion in the effect of particle-sink. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(2): 289-298

technique, and the result is identical with previous experimental outcome. Therefore, according to this study, a hypothesis is presented as follows: a non-pneumatic-conveying air purify technology base on sink's action and particle disperse is feasible.

Key words submicron particle, electrostatic adsorption, particle-sink, LDV, PIV

引 言

近年来,大气中细颗粒物造成的环境污染问题日益突出,已经引起公众的普遍关注,大气悬浮颗粒物的扩散规律及净化技术也成了科学家们关心的热点问题.

大气中存在大量的细颗粒物,不沉降且不扩散,从而形成雾霾.细颗粒物在大气中不扩散是由于空气没有对流,处于静稳状态;颗粒物在大气中不沉降则是因为细颗粒物,特别是亚微米颗粒的运动与分子运动相似,能在大气中长时间悬浮^[1-2].亚微米颗粒在大气中的悬浮运动属于均匀弥散的悬浮体流动^[3],与一般的颗粒悬浮流动问题(如流化床,泥沙流等)不同.刘大有^[4]利用分子运动理论,推出其在大气中可以不需要外力,仅通过自身热运动克服重力保持悬浮的机理.亚微米颗粒在大气中悬浮的机理与工业上和自然界中的需要外力或者速度场来保持悬浮的颗粒悬浮系统不同,其扩散规律也不同.研究亚微米颗粒在静稳大气中的扩散规律对于解决雾霾问题具有重要意义.

目前,研究大气中颗粒物的扩散,主要有两类基本模型:双流体模型^[5]和离散模型^[6].其中,双流体模型广泛应用于稠密的颗粒流问题和大气污染物扩散问题的研究^[7-8],离散模型主要用于研究颗粒与连续相的耦合作用和颗粒的运动轨迹^[9-10].除传统计算流体力学方法外,从微观分子动力学发展出的 Monte-Carlo 法^[11-12],利用少量仿真分子代替真实流体的大量分子,是颗粒流动及颗粒碰撞模拟的一种有效方法,可应用于流化床等稠密气固两相流问题的研究;在微观的格子气自动机方法的基础上,发展出的从介观层面研究复杂流体的 Lattice-Boltzmann 法^[13-14],同样可应用于多相流问题的数值模拟.基于以上经典的两相流研究方法,又发展出了适应于研究大气颗粒物问题的改进方法.如 Mohan 等^[15]通过高斯烟羽扩散模型模拟了大型都市不同污染源分布对大气颗粒物浓度的影响, Mehdi-zadeh 等^[16]利用改善的高斯扩散法模拟点源烟羽在高海拔处的扩散规律.高斯模型的不足是把颗粒看作气体处理,颗粒

的运动只与大气对流和湍流相关. Haszpra 等^[17]结合系集预报和大气颗粒扩散模型研究自由大气中颗粒的扩散变化,李瑞霞等^[18]通过直接模拟研究颗粒物在各向同性湍流中的碰撞概率, Gorle 等^[19]基于雷诺平均模拟得到大气边界层中细颗粒物运动受湍流动能的影响,其中小颗粒的模拟使用离散模型,受计算条件限制,只考虑颗粒受惯性和曳力的作用.丁珏等^[20]利用 Monte-Carlo 法研究雾环境中气溶胶颗粒的演化过程, Aidun 等^[21]利用 Lattice-Boltzmann 法分析了惯性对悬浮在流体中的颗粒的作用.在这些大气颗粒扩散研究中,大量结果^[22]表明,细颗粒物在不同的大气环境中运动规律不同. Holmes 等^[22]指出,在大区域开放大气中,亚微米颗粒的扩散规律与气体污染物相近,而在小空间或复杂大气中亚微米颗粒扩散规律与气体污染物则差别很大.这说明在小空间或复杂流场内颗粒的扩散与连续相不同,研究小空间内亚微米颗粒的扩散不应该使用双流体模型.

对于小空间内的亚微米颗粒问题, Wang 等^[23]提出了一种基于静电除尘技术的细颗粒物净化技术,可以在无气流输运的状态下利用静电吸附净化颗粒,有效改善小空间内空气颗粒污染问题.这种净化技术相当于在封闭空间内置一个颗粒相的汇(下文简称颗粒汇),颗粒在一定的作用下往颗粒汇扩散,研究亚微米颗粒在小空间内的扩散规律也是验证这种无气流输运净化技术可行性的关键.目前能够有效验证小空间流场中亚微米颗粒扩散规律的研究还很少.另外,以上这些研究共同点是:主要关注的是大气对颗粒物运动的影响,基本没有考虑悬浮的颗粒与颗粒间的相互作用;相关的实验研究大多是针对颗粒浓度变化,少有观测颗粒扩散的速度分布规律;研究范围都是大空间开放大气,与雾霾形成的大气静稳状态不同.

本文拟通过实验方法研究小空间静稳空气中亚微米颗粒在颗粒汇作用下的运动规律.在实验室研究成果的基础上^[24],利用静电吸附模拟颗粒的汇作用,通过 PIV(particle image velocimetry, PIV)及

LDV(laser Doppler velocimeter, LDV) 实验测量两个不同尺寸小空间静悬浮系统中亚微米颗粒(浓度范围为 $1 \sim 5 \text{ mg/m}^3$) 在汇作用下的运动规律. 根据实验所得的汇作用下颗粒速度分布数据, 推导出颗粒的速度方程并与连续相汇的速度方程对比, 找出实验中颗粒的扩散规律与连续相扩散规律的异同, 同时验证无气体输运的颗粒净化技术是否可行.

1 实验系统与方法

1.1 PIV 实验装置和方法

1.1.1 静电吸附装置

本文使用的静电吸附装置主要由三部分组成, 阴极线、阳极金属收尘网和绝缘盖, 其中阴极线选用的是螺旋线, 收尘板选用的是不锈钢金属网, 绝缘盖选用的是 ABS 树脂以及 3240 环氧树脂材料. 静电吸附装置的结构和工作原理如图 1 所示(两个实验中使用的静电吸附装置的尺寸不同).

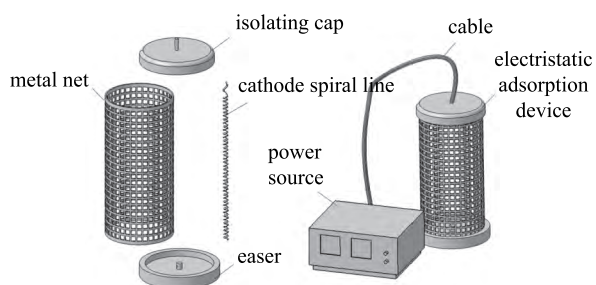


图 1 静电吸附装置结构图

Fig. 1 Electrostatic adsorption device structure

在静电吸附装置内, 颗粒在电晕放电作用下荷电, 然后受电场力作用沉积到收尘网; 静电吸附装置外没有电场作用, 可以忽略电场对颗粒运动的影响. 装置内外产生浓度差, 相对于外部大空间, 该静电吸附装置即形成了颗粒物的汇.

1.1.2 实验系统组成和结构

将直径 60 mm, 高 160 mm 的圆柱型静电吸附装置模型, 放置在 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 的玻璃箱内, 利用德国 LaVision 粒子图像测速仪测量周围流场, 静电吸附装置由天津东文高压电源厂提供的 50 kV 负输出高压直流电源供电. PIV 实验台的结构和实验的测量方式见图 2, 实验时移动相机位置, 转动激光面, 分别测量 XY 面和 YZ 面上颗粒的运动.

1.1.3 实验方法

实验时在玻璃箱中产生一定浓度的亚微米颗粒,

静置至稳定状态后, 给静电吸附装置阴极通高压电, 阳极接地, 模拟颗粒汇, 并用 CCD 相机分别拍摄两个坐标平面上颗粒在汇作用下的运动变化.

测量前, 要根据拍摄视场和颗粒速度调整各项参数, 图像采样频率是 4 Hz, 两帧图像的时间间隔是 10 ms, 采样速度场为 2D2C 场, CCD 相机连续拍摄 150 张照片以求颗粒速度的平均场. PIV 实验中示踪粒子即烟块燃烧产生的烟雾颗粒以及示踪粒子的浓度对图像的清晰度和图像处理的最终结果有很大影响. 本文在 PIV 实验中通过激光粉尘仪 AQM-8000 的便携机确定颗粒的浓度范围为 $1 \sim 5 \text{ mg/m}^3$. 假设颗粒粒径相同且为 $0.5 \mu\text{m}$, 颗粒密度为 1070 kg/m^3 单位体积内粉尘颗粒数为 $10^{10} \sim 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 左右, 激光厚度为 1 mm. PIV 拍摄的视场为 $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$, 相机的像素为 2048×2048 , 后处理初始查询区的设置为 64×64 , 子查询区的设置为 32×32 , 一个子查询区对应的物理场大小约为 $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$, 粒子数约为 10~50 个. 可知实验使用的颗粒浓度范围内, PIV 成像效果及所得速度结果是有效的.

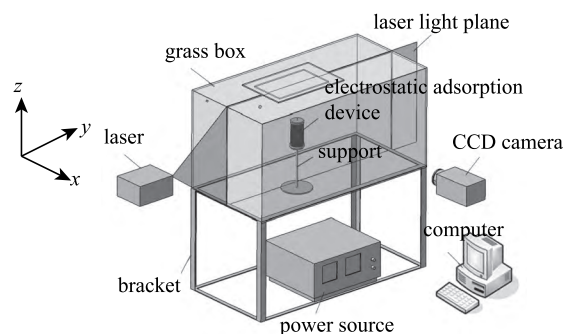


图 2 PIV 实验系统组成和示意图

Fig. 2 PIV experimental system and schematic diagram

1.2 LDV 实验装置和方法

1.2.1 实验系统组成和结构

密闭实验室长 8 m, 宽 7 m, 高 3.5 m. 实验中使用的静电吸附模型结构与 PIV 实验相同. 为更好地模拟面汇作用, 模型为长 1 m、宽 4 m、高 2 m 的方柱, 颗粒的运动速度采用北京飞骊佳科技服务公司提供的 PDSA-2 型相位多普勒测速仪系统进行测量, 测量颗粒浓度的激光粉尘仪是北京聚道合盛科技有限公司提供的 AQM-8000 型空气质量在线监测系统. 静电吸附装置的电源是北京国电龙富科技有限公司生产的 HEP8000 型超高频高压静电电源. LDV 实验台的结构和实验的测量方式见图 3.

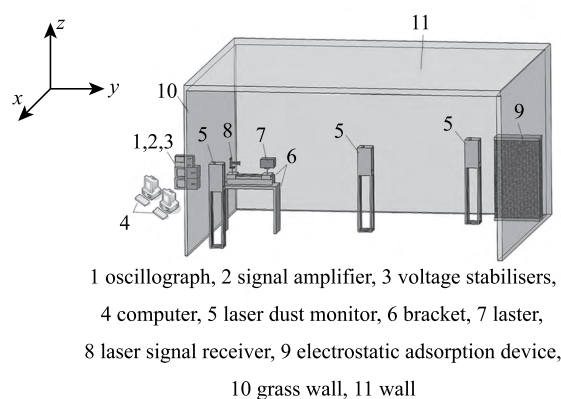


图3 LDV实验系统组成和示意图

Fig.3 LDV experimental system and schematic diagram

1.2.2 实验方法

将激光粉尘仪,多普勒测速仪移动到指定位置并调整为启用状态,与PIV实验一样,实验时在密闭实验室中产生一定浓度的亚微米颗粒,静置至稳定状态后,给静电吸附装置施加高压电模拟颗粒汇,然后用PDSA-2型相位多普勒测速仪系统配套计算机采集不同位置处颗粒的运动速度。

测量前,根据颗粒速度选择合适的光电信号频率范围,采样时间和次数等,测量时通过示波器观察,以预估测量结果是否正常。

2 实验现象及结果分析

2.1 实验用烟雾颗粒的粒径分析

实验中使用的亚微米颗粒是烟块燃烧产生的烟雾,根据烟雾颗粒粒径分析实验结果(如图4),超95%颗粒粒径为亚微米级,颗粒浓度为 6 mg/m^3 时粒径分布的峰值在 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 左右,颗粒浓度为 3 mg/m^3 时粒径分布的峰值在 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 左右。本文所设计实验的持续时间较短,在实验所需时间段中,颗粒的粒径分布基本不变,可不考虑烟雾悬浮时间与颗粒凝并的关系。

图中可看出颗粒的数密度较大,由于颗粒粒径越小,散射度越低,PIV无法识别全部粒径范围内的粒子,因此作为示踪粒子的颗粒数密度与实际颗粒数密度相比应该较小,实验所用浓度的烟雾中大于 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒数浓度约为 10^5 cm^{-3} 。

2.2 亚微米颗粒在空气中的悬浮运动

在PIV实验中,利用CCD相机拍摄亚微米颗

粒在稳定大气中的悬浮状态,得到YZ面上颗粒的运动速度矢量分布及速度云图(图5),从图中可以看出,颗粒运动速度矢量无规则分布。颗粒运动速度大小的分布规律如图6所示,从图中可以看出颗粒速度的分布规律类似于气体分子热运动速率满足的Maxwell速度分布律。

与气体分子类似,细微颗粒在静止大气中做不

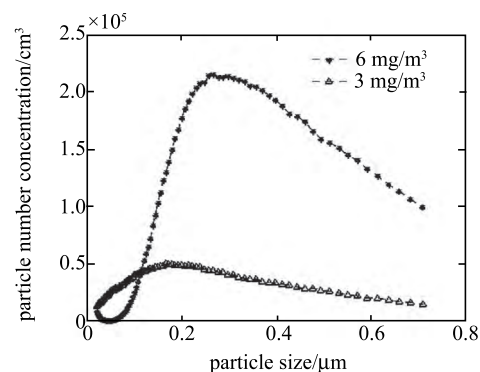


图4 颗粒粒径分布图

Fig.4 Size distribution of particles

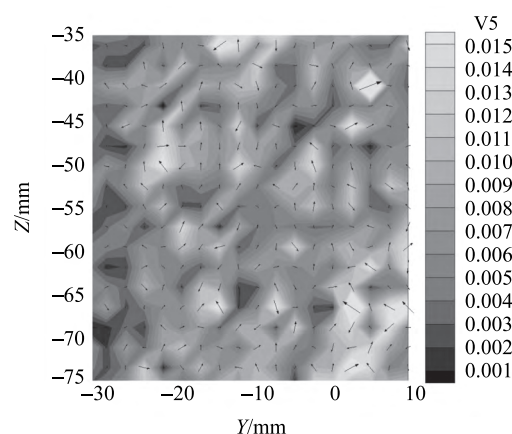


图5 颗粒布朗运动速度矢量图

Fig.5 Cloud chart of particulate Brownian motion

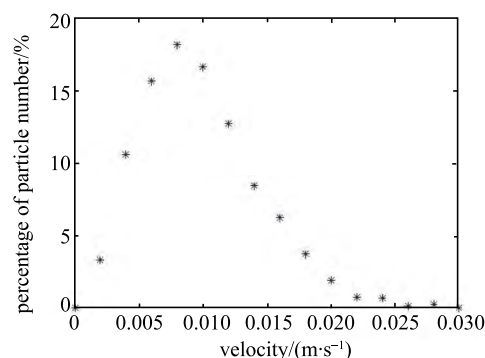


图6 颗粒布朗运动速率分布图

Fig.6 Speed distribution of particulate Brownian motion

规则的热运动,即颗粒的布朗运动.由分子运动理论来分析细微颗粒的布朗运动,颗粒任意方向的平均动能和温度的关系式为^[25]

$$\frac{1}{2}m_p\langle\sigma_x^2\rangle = \frac{1}{2}KT \quad (1)$$

$$\langle\sigma^2\rangle = \frac{1}{3}\langle\sigma_x^2\rangle + \frac{1}{3}\langle\sigma_y^2\rangle + \frac{1}{3}\langle\sigma_z^2\rangle \quad (2)$$

式中, K 为 Boltzmann 常数, $K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$, m_p 为颗粒质量,取单组分等粒径球形颗粒,粒径 $d_p = 0.5 \mu\text{m}$,有效密度^[26] $\rho_p = 1070 \text{ kg/m}^3$,温度 $T = 300 \text{ K}$,对应颗粒的布朗运动速度为 $\langle\sigma_x\rangle^{\frac{1}{2}} = 7.69 \text{ mm/s}$, $\langle\sigma\rangle^{\frac{1}{2}} = 13.32 \text{ mm/s}$.

根据斯托克斯定律,颗粒自由沉降的速度为

$$u_t = \frac{d_p^2 - (\rho_p - \rho_g)}{18\mu} \quad (3)$$

式中 ρ_g 为空气密度,粒径 $d_p = 0.5 \mu\text{m}$,有效密度 $\rho_p = 1070 \text{ kg/m}^3$,在黏度 $\mu = 1.86 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时,对应的自由沉降速度为 $u_t = 7.83 \mu\text{m/s}$

颗粒的自由沉降速度相对布朗运动速度是可忽略的,因此,图 5 中颗粒的速度与亚微米颗粒热运动速度相近,且运动也是无规则状态,表明在悬浮的烟雾颗粒是在做无规则的布朗运动.

由于 PIV 技术的限制并不能识别散射度小的颗粒,实验中颗粒的粒径大小不一,形状多为不规则,因此实验测得的只是一部分较大颗粒的运动速度.实验结果中的颗粒速度范围与粒径在 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 大小的颗粒布朗运动速度接近.综合考虑 PIV 测量限制与颗粒热运动规律,可得出实验结果总体上与颗粒布朗运动理论值是相符的.

2.3 颗粒在汇作用下的实验现象

2.3.1 PIV 实验结果

PIV 实验中测量了常温下,初始颗粒浓度为 5 mg/m^3 ,工作电压分别为 12 kV , 14 kV , 16 kV 时,垂直面(YZ 面)以及水平面(XY 面)上颗粒的运动情况.

(1) 颗粒在汇作用下的运动规律

实验得到颗粒在静电吸附装置形成的颗粒汇作用下的运动规律如图 7 所示,图中可以看出场中颗粒的运动方向均指向静电吸附装置,且速度大小与距装置的距离成反比.实验过程中,静电吸附装置内

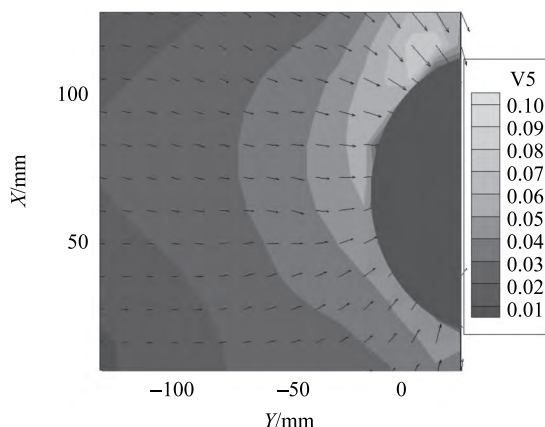


图 7 圆柱模型水平面颗粒运动矢量图

Fig. 7 Particles' velocity vector around sink

放电不均匀影响了装置对颗粒汇作用的均匀性,导致圆柱形装置外颗粒的速度非完全对称.

(2) 颗粒在不同强度汇作用下的运动规律

实验还测量了颗粒在不同强度汇作用下的速度场.图 8 给出两个坐标平面上,不同电压下颗粒的运动速度矢量云图.圆柱模型在 YZ 面上的投影为矩形,颗粒的运动速度与颗粒距模型 X 向的距离成反比,运动速度分布如图 8(a) 所示;圆柱模型在 XY 面上的投影为圆形截面,实验中颗粒的运动速度与距模型表面的距离成反比. XY 面颗粒的运动速度分布如图 8(b) 所示.

从图 8 中可以看出,颗粒的速度分布与静电吸附装置的工作电压大小相关,电压大时,颗粒的运动速度也更大.另外,虽然颗粒的速度大小不同,但速度变化趋势相同,在静电吸附装置工作时,不同位置的颗粒运动速度都一定程度增大,且大小与距装置的距离成反比.在 PIV 拍摄视场内,颗粒距静电吸附装置的距离为 $0 \sim 150 \text{ mm}$,电压 16 kV 时,颗粒的速度为 $11 \sim 2$ 倍的布朗运动速度;电压为 14 kV 时,颗粒的速度为 $6 \sim 2$ 倍的布朗运动速度;电压为 12 kV 时,颗粒的速度为 $3 \sim 2$ 倍的布朗运动速度.

PIV 实验中,由于颗粒的运动速度量级很小,颗粒的运动易受到周边环境的干扰,而靠近玻璃箱位置的颗粒会受壁面影响,因此静电吸附装置应尽量放置在玻璃箱中间位置.静电吸附装置上下端为绝缘盖,考虑到装置的端部效应,实验只截取模型中间段的拍摄图像.此外,大气湿度和温度对阴极线的电晕放电效果影响很大,在工作电压相同,大气的温湿度的不同的情况下,静电吸附模型的汇作用强

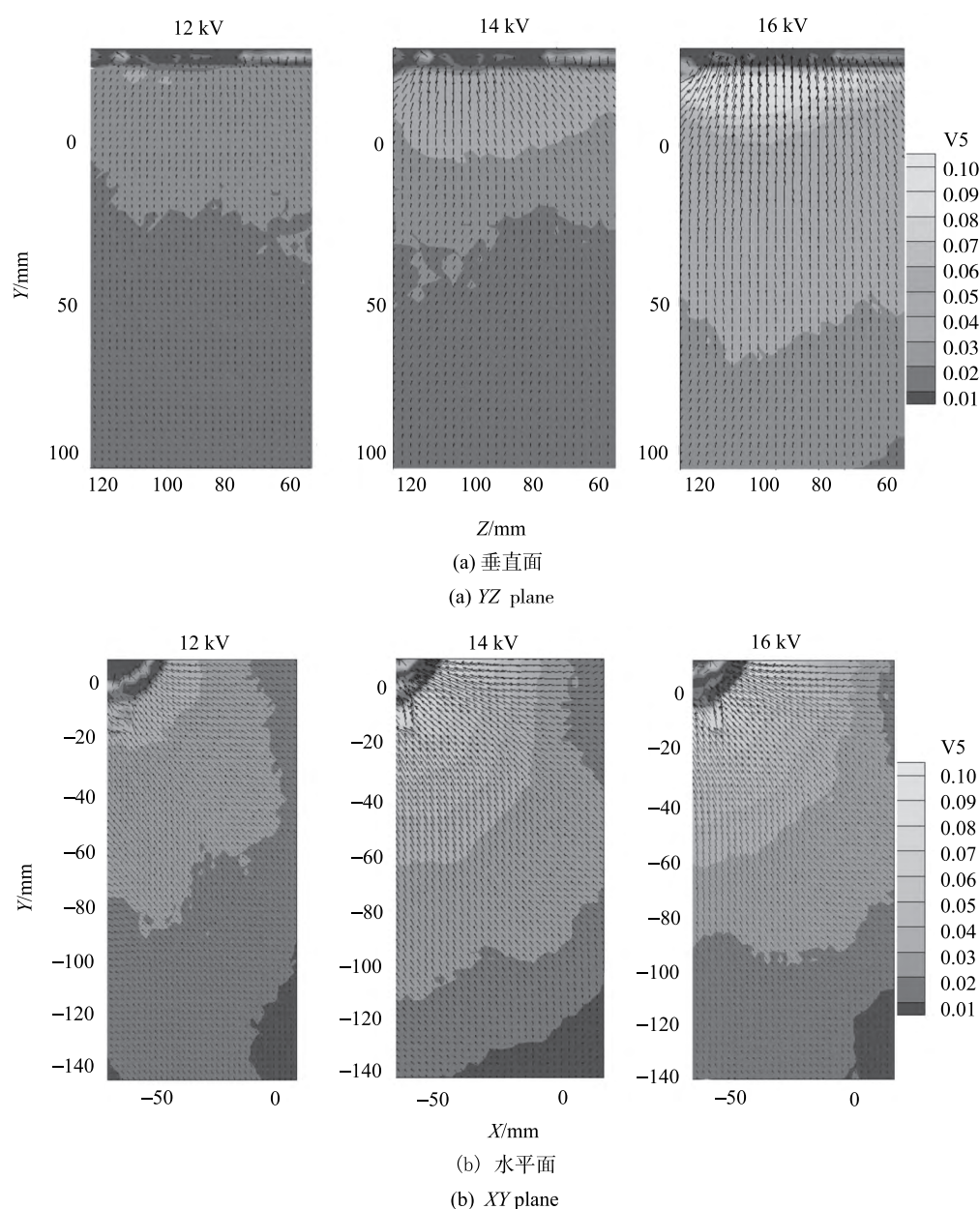


图8 颗粒运动速度矢量云图

Fig. 8 Particles' motion vector around cylinder model

度不同. 为了使实验结果更可靠, 相机每次实验拍摄150对图像分析处理后求颗粒运动速度的平均场, 并在一个时间段连续完成不同电压的实验, 尽量减小大气环境变化带来的误差.

2.3.2 LDV 实验结果

(1) 不同位置颗粒的运动速度和浓度变化

LDV 实验在常温密闭实验室内, 测量了静电吸附装置不工作时, 以及工作电压为 65 kV 时, 距离装置 1 m, 3 m, 6 m 处颗粒的运动速度和颗粒浓度变化, 如图 9 所示.

由实验数据可以看出, 与 PIV 实验结果一样, 在静电吸附模型工作时, 不同位置的颗粒运动速度都一定程度增大. 距离最近的测量点颗粒的运动速度增加了 7~10 倍, 随着距离增大, 颗粒的速度相对减小. 静电吸附装置工作时, 颗粒的浓度持续下降. 实验中其他条件相同, 颗粒相浓度高时, 颗粒净化速度快; 颗粒相浓度低时, 颗粒的净化速度慢, 这与颗粒间的相互碰撞频率相关. 颗粒的相互碰撞频率与颗粒间自由行程 (颗粒的浓度) 相关, 浓度越低, 颗粒间距越大, 颗粒的平均碰撞时间延长, 颗粒的扩散速度也降低, 因而净化速度慢.

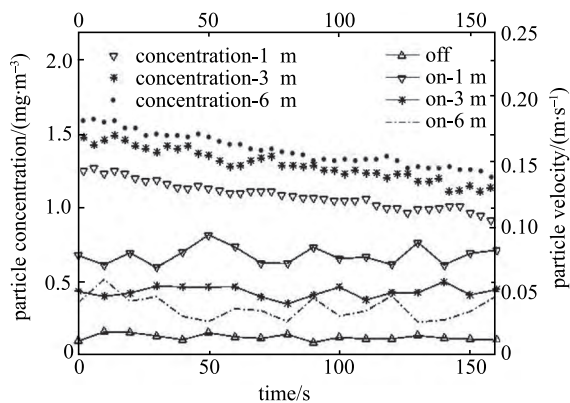


图 9 有/无点汇作用时不同位置颗粒浓度和运动速度

Fig.9 Particles' velocity and concentration in LDV experiment

(2) LDV 测速的采样分布

LDV 测速仪测得的颗粒运动速度是某点多次采样的平均结果, 实验设置的采样次数为 200 次. 在距离模型 1 m, 3 m, 6 m 处采样点测得的颗粒速度分布如图 10 所示.

从图 10 中可以看出, 测量点位置颗粒速度的波动不大, 但速度平均值增大, 且颗粒整体的速度也增大.

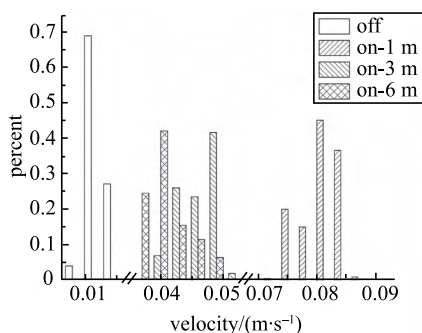


图 10 有/无点汇时颗粒运动速度分布直方图

Fig.10 Sampling particles' velocity distribution

(3) 工作电压与颗粒速度的关系

在温度 23 °C, 相对湿度 45% 的条件下, 静电吸附装置在不同电压下工作时, 通过 LDV 测量距离装置 1 m 处颗粒的运动速度变化, 得到相关关系如表 1 所示.

从表格中可知负极起晕电压在 10~20 kV 之间, 电压从 30 kV 增大到 70 kV, 颗粒的速度相应增大, 电压增大到 70 kV 后颗粒的运动速度基本不再增大, 电压大于 80 kV 正负两极间空气出现击穿现象. 可以看出, 颗粒的速度分布与电压大小相关, 电压大时, 颗粒的运动速度也更大.

表1 颗粒速度与模型电压关系

Table 1 The relationship between particle's velocity and model's voltage

V/kV	I/mA	v/(dm·s ⁻¹)
30	0.135	0.228
40	0.41	0.292
50	0.79	0.35
60	1.26	0.62
70	2.04	1.237
80	2.67	1.228

2.4 实验结果分析

2.4.1 颗粒速度场经验公式

在密闭空间内, 大气宏观上处于静止状态, 不考虑对流、热辐射、湍流等影响, 颗粒克服重力保持悬浮是依靠颗粒与颗粒间, 颗粒与固壁间的碰撞以及空气对颗粒的浮力^[27]. 研究静止大气中颗粒的扩散, 只考虑颗粒间的作用以及气体对颗粒的浮力和阻力. 根据钱学森的研究^[28], Knudsen 数等于或小于 0.001 时, 颗粒相可以作为连续相处理. 假设大气中细微颗粒粒径相同且为 0.5 μm, 颗粒浓度为 500~5 000 μg/m³, 研究室内或室外小空间大气颗粒污染问题时, 颗粒相 Knudsen 数约为 10⁻³ 量级, 且颗粒浓度降低以后颗粒相 Knudsen 数增大, 没有明确的证据表明这种情况下的颗粒运动能划分为连续相或者离散相.

连续流体中, 含汇和源的运动的理论很完善, 可以给出连续相线汇场, 面汇场的运动方程如下.

线汇的速度场为

$$U = -\frac{q}{2\pi} \left(\frac{xi}{x^2 + y^2} + \frac{yj}{x^2 + y^2} \right) \quad (4)$$

面汇的速度场为

$$U = -\frac{q}{2\pi} \left(\frac{i}{x} \right) \quad (5)$$

式中, q 为汇的强度, 线汇为单位长度流量, 面汇为单位面积流量.

在颗粒在静止大气中悬浮的基础上, 把汇作用下颗粒受到的作用力, 加入悬浮运动模型^[4]中, 可以推导出颗粒在汇作用下, 在垂直平面内的运动方程.

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial P}{\partial z} - \alpha_p \frac{\partial p}{\partial z} + \alpha_p \rho_p g + F_{p,z} &= 0 \\ \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{\partial P}{\partial y} + F_{p,y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中 $\partial P/\partial x, \partial P/\partial y$ 是颗粒间碰撞的作用力的 y 向、 z 向分量, $\alpha_p \partial p/\partial z$ 是气体对颗粒的浮力, $F_{p,y}, F_{p,z}$ 分别是气体对颗粒的阻力 y 向、 z 向分量, $\alpha_p \rho_p g$ 是颗粒相的重力.

在实验模型内颗粒运动的主要作用力是库仑力, 颗粒荷电后受电场力作用, 电场力的作用比浓度梯度产生的作用力大很多; 实验模型外, 没有电场分布, 颗粒运动的主要作用是浓度梯度. 静电吸附作用使得实验模型内颗粒的浓度降低, 与模型外形成浓度梯度, 颗粒数浓度的不平衡使得颗粒碰撞作用力不平衡, 产生了指向颗粒汇的作用力 $\partial P/\partial y$, 颗粒在这个作用下产生指向吸附装置的运动速度. 这种作用随颗粒到汇的距离的增大而减弱, 当颗粒到汇的距离增大到一个极限后, 颗粒汇的作用可忽略, 颗粒的运动开始有定向迁移转为无规则的布朗运动, 但是这个过程中颗粒的速度始终不为 0. 由前面的实验结果和运动方程分析可以推出颗粒在汇作用下的运动速度 - 距离关系式要满足下面两个条件

$$V_{\max} = f(0), V_{\infty} = f(\infty)$$

其关系式的形式可以假设为

$$f(x) = \frac{p_1 x + p_2}{x + q_1} \quad (7)$$

式中, p_1, p_2, q_1 是待定系数.

受实验条件和技术原理的限制, PIV 相机只能拍摄有限的流场范围, LDV 只能测量若干个点的颗粒运动的平均速度. 因此, 通过实验只能得到一定范围内颗粒的运动速度, 无法测量无穷远处颗粒的速度, 上面给出的第二个条件不能确定. 但是, 实验中发现装置在不同工作电压下, 虽然最近处颗粒的运动速度不同, 距离装置越来越远后, 颗粒速度分布曲线逐渐趋于相合 (见图 9).

假设实验中距吸附装置最近的颗粒速度为 $V_{\max}$, 距离吸附装置 d_0 处, 不同汇强度实验中颗粒速度大小同为 V_0 , 即颗粒的速度分布关系式满足

$$V_{\max} = \frac{p_1}{q_1}, V_{dy=d_0} = f(x = d_0) = V_0$$

将这两个条件代入前面给出的颗粒速度分布关系式中, 可以得到简化的关系式

$$f(x) = \frac{V_{\max} q_1 x + (V_0 - V_{\max} q_1) d_0 + V_0 q_1}{x + q_1} \quad (8)$$

这是 PIV 实验中垂直面颗粒运动速度与距离静电吸附模型表面 Y 向位移的关系, 将这个关系式与连续相的面汇速度方程对比, 两式相似但显然不一致, 可以推断, 颗粒的运动速度与连续相有限面汇的速度场具有类似的变化趋势但是不满足连续方程. 利用前面给出的关系式拟合实验数据, 利用颗粒粒径, 颗粒布朗运动速度对颗粒位置和运动速度无量纲化, 得到几组颗粒速度分布关系曲线如图 11. 将拟合曲线的关系式代入连续方程中可以明显看出, 颗粒相不满足连续方程, 颗粒不是连续相, 但具有接近连续相的性质, 且浓度越高, 颗粒相性质越接近连续相.

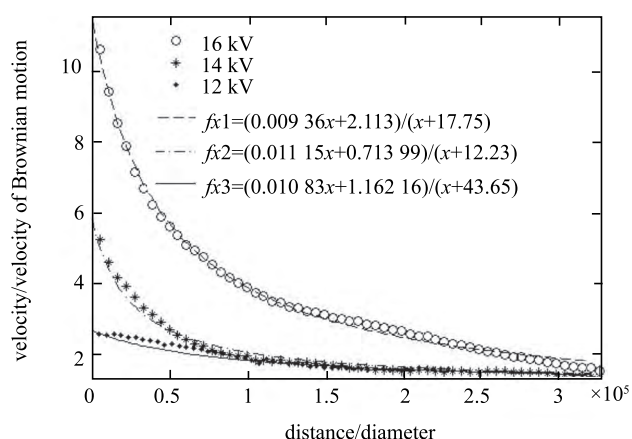


图 11 颗粒速度-位置关系拟合曲线

Fig. 11 Fitting curve of particles' velocity-distance relationship

2.4.2 实验可靠性分析

PIV 实验中, 实验操作严格满足测量参数控制准则 [29], 按要求进行校准和标定. 实验后图像处理使用互相关算法, 由于实验中气体相的运动可忽略, 颗粒为亚微米级且速度很小, 认为拍摄的速度即为颗粒的运动速度, 颗粒跟随性对计算精度的影响可忽略不计. 对实验数据进行误差分析, 数据标准差小于 1.5 mm/s, 误差小于 5%.

LDV 实验中观测不同位置颗粒的速度及不同电压下颗粒同一位置的运动速度, 均与 PIV 实验结果相符, 误差小于 3%, 可说明实验数据是可靠的.

3 结论

本文分别通过 PIV 和 LDV 技术测量了亚微米颗粒在静稳小空间内的运动, 并静电吸附装置内置于

实验空间内模拟颗粒汇,测量亚微米颗粒在汇作用下的扩散规律.从实验结果可以得出以下结论:

(1) 由实验中颗粒的迁移速度分布具有类似于连续相汇的速度方程的性质,可以得出推论,实验所选 500~5 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 浓度范围内的颗粒具有近似连续相的性质,但是不满足连续方程.因此,在研究室内或者小空间内大气颗粒污染物问题时不应该使用连续相模型.

(2) 以文中提出的静电吸附装置为原理模型的无气流运输的大气细微颗粒物净化技术是可行的.这样的装置与传统的收集-输送-净化的方式不同,可以利用静电对颗粒的吸附、颗粒本身的热运动、浓度梯度的作用以及空气对流等因素实现颗粒向模型表面扩散并沉积.相对于一般的利用气流输运污染物至净化单元的空气净化器来说,大大的简化了空气颗粒污染物的净化过程,减少了能耗.

实验中,颗粒的热运动和阴极线的放电特性受空气湿度、温度影响,要确定汇作用下颗粒速度分布规律的通用经验公式的参数,还需要进行更复杂更全面的实验.

参 考 文 献

- Seibert KD, Burns MA. Simulation of fluidized beds and other fluid-particle systems using statistical mechanics, *AIChE Journal*. 1996, 42(3): 660-670
- Wang H, Xu JY. A study of the meteorological causes of a prolonged and severe haze episode in January 2013 over central-eastern China. *Atmospheric Environment*, December 2014, 98: 146-157
- 刘大有. 二相流体动力学. 北京: 高等教育出版社, 1993 (Liu Dayou. Fluid Dynamics of Two-phase System. Beijing: Higher Education Press, 1993 (in Chinese))
- 刘大有. 关于颗粒悬浮机理和悬浮功的讨论. 力学学报, 1999, 31(6): 661-671 (Liu Dayou. Discussion on particle suspension mechanism and suspension work. *Acta Mechanica Sinica*, 1990, 31(6): 661-671 (in Chinese))
- Horio M, Lwadata Y, Sugaya T. Particle normal stress distribution around a rising bubble in a fluidized bed. *Powder Technology*, 1998, 96(2): 148-157
- Tsuji Y. Multi-scale modeling of dense phase gasparticle flow. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62: 3410-3418
- Enwald H, Peirano E. Eulerian two-phase flow theory applied to fluidization. *International Journal of Multiphase Flow*, 1996: 21-66
- Houim RW, Oran ES. A multiphase model for compressible granular-gaseous flows: formulation and initial tests. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 789: 166-220
- Yin XL, Sundaresan S. Fluid-particle drag in low-Reynolds-number polydisperse gas-solid suspensions. *AIChE Journal*, 2009 55(6): 1352-1368
- Tenneti S, Mehrabadi M, Subramaniam S. Stochastic Lagrangian model for hydrodynamic acceleration of inertial particles in gas-solid suspensions. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016. 788: 695-729.
- Metropolis N, Rosenbluth AW, Rosenbluth MN, et al. Equation of state calculations by fast computing machines. *The Journal of Chemical Physics*. 1953, 21(6): 1087-1092
- Dietrich S, Boyd ID. A Scalar optimized parallel implementation of the DSMC technique. *Journal of Computational Physics*. 1996, 126: 328-342
- Frisch U, Hasslacher B, Pomeau Y. Lattice gas automata for the Navier-Stokes equations. *Physical Review Letters*. 1986, 56: 1505
- Chen S, Doolen GD. Lattice Boltzmann method for fluid flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1998, 30: 329-364
- Mohan M, Bhati S, Rao A. Application of air dispersion modelling for exposure assessment from particulate matter pollution in megacity Delhi. Asia-Pacific. *Journal of Chemical Engineering*, 2011(6): 85-94
- Mehdizadeh F, Rifai HS. Modeling point source plumes at high altitudes using a modified Gaussian model. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 821-831
- Haszpra T, Lagzi I, Tél T. Dispersion of aerosol particles in the free atmosphere using ensemble forecasts. *Nonlinear. Processes Geophys*, 2013, 20: 759-770
- 李瑞霞, 柳朝晖, 贺铸等. 各向同性湍流内颗粒碰撞率的直接模拟研究. 力学学报, 2006, 38(1): 25-32 (Li Ruixia, Liu Zhaohui, He Zhu, et al. Direct numerical simulation of inertial particle collisions in isotropic turbulence. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2006, 38(1): 25-32(in Chinese))
- Gorle' C, Van Beeck J, Rambaud P, et al. CFD modelling of small particle dispersion: The influence of the turbulence kinetic energy in the atmospheric boundary layer. *Atmospheric Environment*, 2009, 43: 673-681
- 丁珏, 李家骅, 邱晓等. 蒙特卡洛方法数值研究大气颗粒物动力学效应和辐射传输性质. 力学学报, 2016, 48(3): 557-565 (Ding Jue, Li Jiahua, Qiu Xiao, et al. Numerical study on dynamics effect and radiation transfer characteristics of atmospheric particle by Monte-Carlo method. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(3): 557-565(in Chinese))
- Aidun CK, Lu Y, Ding EJ. Direct analysis of particulate suspensions with inertia using the discrete Boltzmann equation. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, 373: 287-311
- Holmes NS, Morawska L. A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: an overview of different dispersion models available. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(30): 5902-5928
- Wang LZ, Niu HT, Peng NN, et al. Research into haze removal method based on diffusion and relative motion. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, 16(7): 1757-1763
- 王连泽. 空中净化装置. 中国专利: CN203797840U, 2014-08-27
- 袁竹林. 气固两相流动与数值模拟. 南京: 东南大学出版社, 2013 (Yuan Zhulin. Gas-Solid Two Phase Flow and Numerical Simulation. Nanjing: Southeast University Press, 2013(in Chinese))
- 张国华, 毕新慧, 韩冰雪等. 单颗粒气溶胶质谱测定颗粒的有效密度. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(12): 1886-1894 (Zhang Guo-

- hua, Bi Xinhui, Han Bingxue, et al. Measurement of aerosol effective density by single particle mass spectrometry. *Science China: Earth Sciences*, 2015, 45 (12): 1886-1894 (in Chinese))
- 27 Koch DL. Kinetic theory for a monodisperse gas-solid suspension. *Physics of Fluids*, 1990, 2(10): 1711-1723
- 28 Tsein HS. Superaerodynamics, mechanics of rarefied gases. *Journal of Aeronautical Science*, 1946, 13: 653-664
- 29 Keane RD, Adrian RJ. Optimization of particle image velocimeters. Double-pulsed systems. *Measurement Science and Technology*, 1990, 1(11): 1202-1215