

利用 APD 对大气气溶胶空气动力学直径测量分析*

连 悦 刘文清 张天舒 刘建国

(中国科学院环境光学与技术重点实验室, 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘 要 详细介绍了气溶胶大气粒子经过两个激光束后通过雪崩二极管(APD)探测其形成的双峰信号, 从而得到气溶胶粒子飞行时间的方法, 利用标准粒子对飞行时间进行校准后, 实现了对大气气溶胶粒子直径的实时监测. 通过不同粒径多组的实验数据进行分析组成专家模式, 代入系统进行空气测量或标准粒子测量, 得到的实验值与理论值一致.

关键词 气溶胶; 飞行时间; 雪崩光电二极管; 粒径

中图分类号 O443 **文献标识码** A

0 引言

气溶胶可分成粉尘、烟、飞灰、雾、霾、霾等. 人们在谈到气溶胶时, 通常都是指分散体系中的分散相即悬浮粒子而言的. 以分散相处于悬浮状态的粒子, 称为气溶胶粒子. 大气中的气溶胶粒子的自然来源主要是海洋、土壤和生物圈以及火山等. 气溶胶对气候的变化、云的形成、能见度的改变、大气微量成分的循环及人类健康有着重要影响, 所以一种合适的检测方法显得尤为重要^[1].

本文报导了利用飞行时间及标准粒子来对大气中的粒子进行检测和标定的方法, 包括该方法的原理, 实验仪器的组成及实验过程, 并且从理论计算和实际测量角度对气溶胶粒子粒径大小和空气中粒径的分布进行了分析和讨论.

1 测量气溶胶粒子空气动力学理论

空气动力学直径通常参考了粒子沉降速度, 空气动力学直径定义为与考察的粒子具有相同的沉降速度的单位密度球形粒子的直径^[2].

粒子的运动方程为

$$m \frac{d\mathbf{U}}{dt} = \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_b \quad (1)$$

式中 m 为粒子质量; \mathbf{F}_d 为作用到粒子上的牵引力; \mathbf{F}_b 为作用到粒子上的质量力.

雷诺数 $Re_p < 0.5$ 的球形粒子的牵引力由斯托克斯定律(Stokes law)表示为

$$\mathbf{F}_d = \frac{(\mathbf{u} - \mathbf{v})3\pi\mu D_p}{C} \quad (2)$$

式中 C 为坎宁安修正因子; \mathbf{u} 和 \mathbf{v} 分别为气溶胶粒子重心的速度和粒子周围的空气速度. 而雷诺数 Re_p 为

$$Re_p = \frac{|\mathbf{u} - \mathbf{v}| \rho D_p}{\mu} \quad (3)$$

若粒子在静止空气中沉降, $\mathbf{v} = 0$, $\mathbf{F}_d = mg$, 当牵引力等于重力时, 粒子达到终极速度 U_t . 因此, 在斯托克斯区域($Re_p < 0.5$)得

$$U_t = \frac{CD_p^2 \rho_p g}{18\mu} \quad (4)$$

上述分析对 $1 \mu\text{m}$ 以下的粒子是非常重要的, 同时粒子应处于低雷诺数 $Re_p < 1$ 的情况下, 即惯性力和粘滞力相比可以被忽略情况下使用. 但是在气溶胶粒子较大或运行速度很高的时候, 粒子处于高雷诺数时牛顿阻力会起作用.

粒子在运行当中所遇到的牛顿阻力为

$$F_p = \frac{\pi}{8} C_D \rho_p D_p^2 v^2 \quad (5)$$

式中 C_D 为阻力系数; ρ_p 为空气介质密度; v 为粒子运行速度. 当 $Re_p < 1$ 时

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad (6)$$

粒子雷诺数 Re_p 和阻力系数 C_D 皆为粒子速度的函数^[3].

当 $1 < Re_p < 1000$ 时

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left(1 + \frac{Re_p^{2/3}}{6}\right) \quad (7)$$

斯托克斯定律和雷诺数及牛顿阻力等公式说明, 气溶胶粒子的极限沉降速度因粒子的空气动力学直径不同而不同. 根据以上原理, 采用双激光束的方法来测量与极限沉降速度成反比的飞行时间, 然后通过标准粒径气溶胶粒子的飞行时间与待测粒子的飞行时间进行比较, 得到待测气溶胶粒子的空气动力学直径, 实验结果非常好.

2 气溶胶粒径和飞行时间的检测方法

2.1 气溶胶检测系统的组成

红光光源是由 650 nm 半导体激光二极管产生的连续光^[4], 利用透镜组形成两个互相重叠的光束,

* 国家 863 计划(2002AA641020)资助项目

Tel: 0551-5591581 Email: lian_yue@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2004-09-23

经过透镜聚焦在喷嘴下约 0.2 mm 处,然而整个腔体是由单个椭球镜组成,如图 1.

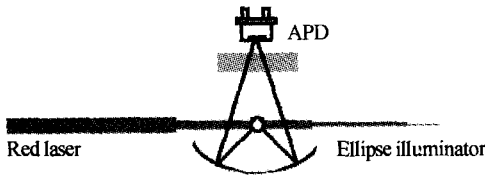


图 1 APD 探测散射光系统
Fig.1 System of the APD detecting the scattered light

当粒子穿过红光光斑时,发生粒子散射.其散射光经椭球镜会聚在对面椭球镜中心开孔处的 APD 上,由于粒子连续经过两束激光分别产生散射,所以经 APD 转换后得到一个双峰电信号,经过数字板专家系统处理后显示其对应的粒径位置.由于是连续过程,所以可以看到实时的显示粒径谱分布.

2.2 气溶胶粒径与飞行时间的关系

当产生的标准粒子通过内喷嘴出来,与外喷嘴的干净气流一同经过两个重叠的激光光斑时,通过雪崩二极管 APD 对其散射光的探测形成两个基本相同的峰,如图 2.把这两个峰之间的时间差,称为粒子的飞行时间.由于每个粒子大小不同,飞行速度不同,所以通过两激光束之间的距离所用的时间也不同,大粒子由于其沉降速度相对慢故其飞行时间较长,而小粒子恰好相反,由此就可以找到飞行时间和不同粒径之间的关系.

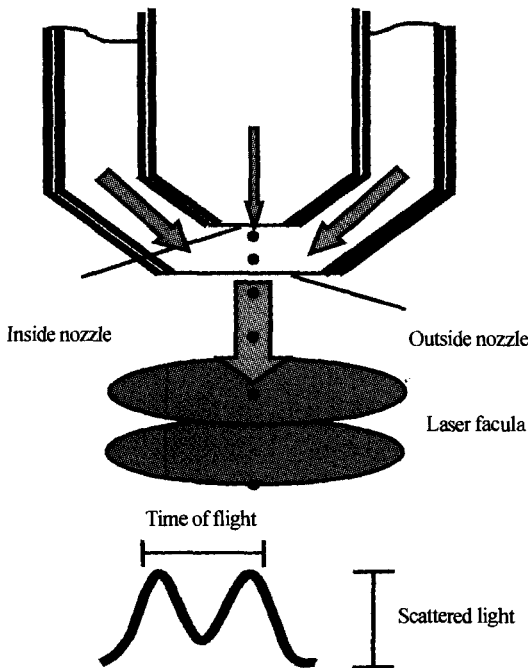


图 2 飞行时间原理图
Fig.2 Schematic diagram of the time of flight

3 实验及多组粒径和飞行时间的标定过程分析

3.1 实验仪器及方法

产生标准粒径气溶胶粒子的仪器较多,应用的是美国 TSI 公司生产的 Model 3450 振动孔气溶胶粒子发生器(Vibrating Orifice Aerosol Generator, VOAG),该仪器可以产生高准确度单一粒径分布的气溶胶粒子^[5].用 TSI 3450 VOAG 产生的不同粒径的 DOP(邻苯二甲酸二正辛酯,分析纯)为溶质,乙醇为溶剂,产生单分散的气溶胶粒子.

3.2 实验标定过程及数据处理分析

按照 TSI 3450 配比出不同粒径大小的粒子,同时也可算得粒子粒径的理论计算值.实验中测量了各种粒子在两个连续激光束间的飞行时间,对气溶胶粒子粒径大小与粒子飞行时间之间的关系进行了初步测试.利用示波器可以观察到 APD 输出双峰之间的时间,采集 50 次平均,如表 1.

表 1 粒径和飞行时间的关系

Impregnant Proportion	Particle Size Academic Numerical value/ μm	Time of flight/ns
5.19E-06	1.127	660
2.06E-04	2.576	780
4.11E-04	3.56	860
8.10E-04	4.305	960
0.0019	5.716	1080
0.0038	6.958	1200
Change 3450 frequency	7.445	1220
0.0083	8.882	1300
Change 3450 frequency	9.184	1340
0.0207	12.444	1520

通过不同粒径的实验可以得出定标曲线,同时可计算得出粒径大小和飞行时间的关系.按照测定的数据,拟合出飞行时间与粒径的曲线,如图 3,此曲

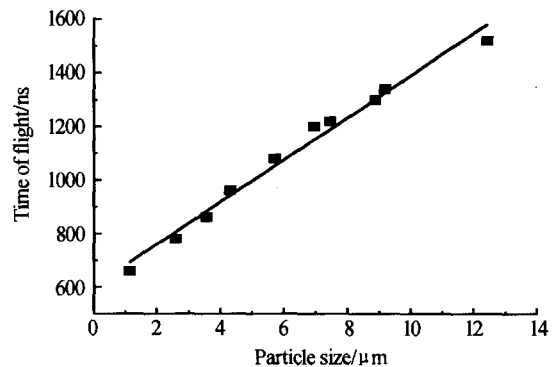


图 3 粒径与飞行时间拟合线
Fig.3 Fit curve of the particle size and the time of flight

线应以指数形式拟合,其曲线拟合公式为

$$y = y_0 + e^{A_1 x + t_1} \tag{8}$$

式中 $y_0 = -3579642.5$; $A_1 = 3580245.5$; $t_1 = 45560.1$

通过上面的标定结果,组成专家模式用于系统中,就完成了整个通过飞行时间和标准粒径粒子对系统的标定.

对发生不同的单分散粒子进行测量,并对测量结果进行记录,通过间隔 10 天的两次标定,经过数据统计其测定的曲线基本吻合,足以证明该设备利用飞行时间测量粒子空气动力学直径的方法稳定性很高,如图 4.

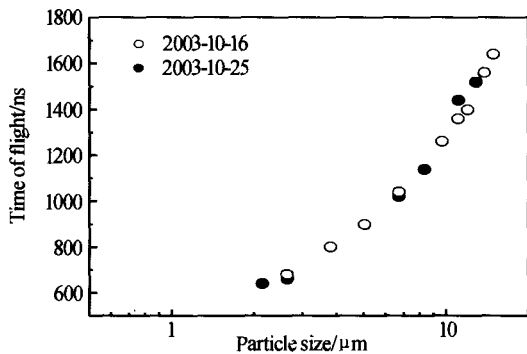


图 4 不同时间的实验的比较
Fig. 4 Comparison of the experiment results of different time

3.3 实际粒谱测量与分析

应用上述方法标定的仪器,分别对空气中及单一粒子进行测量并观察其粒谱的分布情况. 对于单分散粒子其粒谱谱图为单一的柱状图,如图 5,横坐标为粒径,纵坐标为粒子数.

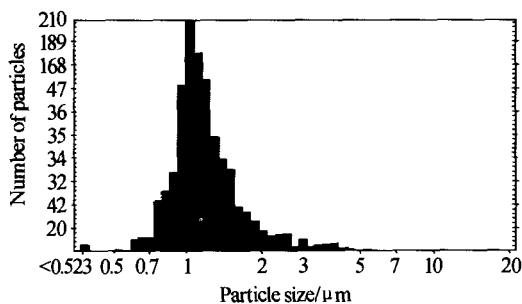


图 5 单分散粒谱分布
Fig. 5 Distributing chart of Single divided particle

如果一个特定的试验系统需要的是多分散的气溶胶,则所发生的气溶胶的粒子大小分布应该是可再现的,空气中粒谱的分布应该有一定的规律^[6]. 气溶胶粒子的分散度用相对标准偏差(离差系数) α 表示,它是粒子大小的标准偏差 σ 和粒子平均大小(粒子平均半径) \bar{r} 之比.

$$\alpha = \frac{\sigma}{\bar{r}} = \frac{[\sum_i (r_i - \bar{r})^2 / N]^{1/2}}{\bar{r}} \tag{9}$$

在 α 值足够大时,粒子半径对数的标准偏差近似等于 α . 因为气溶胶大小多少都是服从对数正态分布的,所以

$$\ln \sigma_g = \left\{ \frac{\sum_i [\ln(r_i / \bar{r}_g)]^2}{N} \right\}^{1/2} \tag{10}$$

其中知道 \bar{r}_g 为几何平均半径

$$\bar{r}_g = \left[\prod_i (r_i) \right]^{1/N} \tag{11}$$

实验测量的空气粒谱的分布就是一种对数的正态高斯分布如图 6,证实了上述的理论分析.

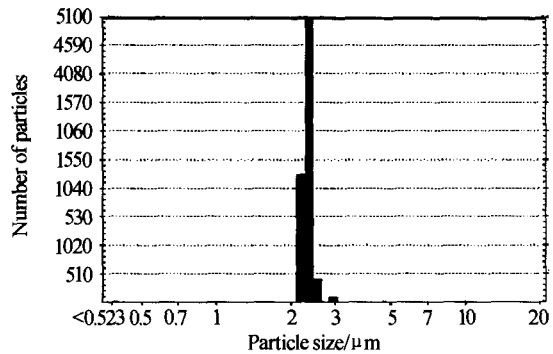


图 6 粒谱分布趋势图
Fig. 6 Distributing chart of multi-particles

4 实验结果和讨论

实验结果表明“应用标准气溶胶粒子同飞行时间的标定方法”的正确性和可行性,并且能够看到粒谱的分布及单分散粒子测量的准确性. 但由于实验发生粒子设备的局限性,对于小于 $0.9 \mu\text{m}$ 的粒子不能发生,所以在标定测量中小于 $0.9 \mu\text{m}$ 的粒子无法定量,只能在线性拟合中计算给出,但对于 $0.9 \mu\text{m}$ 以上的粒子分布可以认为是正确的.

5 结论

实验给出了飞行时间与粒子空气动力学直径之间的标定曲线,并根据给出的标定曲线测量了不同粒径单分散粒子的直径,多次分时测量分析证明,测量准确性较高. 此外还可对空气中的粒谱分布进行探测,并与理论给出的对数正态分布值进行比较,证明应用该标定方法对测量粒谱分布与理论分布形态完全一致. 一般而言,粒径大于 $30 \mu\text{m}$ 的颗粒,进入下呼吸道的可能性很小, $10 \sim 30 \mu\text{m}$ 的颗粒绝大部分沉积在鼻腔, $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 的颗粒可进入气管和支气管,只有小于 $5 \mu\text{m}$ 的颗粒 PM5 才能进入到深部呼吸道和散布于肺泡上. 显而易见,只有小于 $10 \mu\text{m}$ 的粒子气溶胶才是最危险的. 故而该研究方法完全可实现对小于 $10 \mu\text{m}$ 的粒子进行探测,对环境保护将起重要作用.

致谢:北京军事医学科学院五所鹿建春主任对实验的帮助和支持,在此表示衷心感谢!

参考文献

- 1 王明星,张仁健. 大气气溶胶研究的前沿问题. 气候与环境研究, 2001, (6): 119~124
Wang M X, Zhang R J. *Climatic and Environmental Research*, 2001, (6): 119~124
- 2 James Charles Wilson, Benjamin Y H Liu. Aerodynamic particle size measurement by laser-doppler velocimetry. *J Aerosol Sci*, 11(4): 139~150
- 3 James Charles Wilson, Benjamin Y H Liu. *J Aerosol Sci*, 1989, 11(1): 139
- 4 李九生, 鲍振武, 金杰. 半导体激光器的噪声特性神经网络仿真. 光子学报, 2005, 34(2): 195~198
Li J S, Bao Z W, Jing J. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(2): 195~198
- 5 Model 3450 Vibrating Orifice Aerosol Generator Instruction Manual P/N1933450. Revision L October, 2002, 15(1): 106
- 6 理查特. 丹尼斯[美]. 气溶胶手册, 1988. 25~30
Dennis R. *Aerosol handbook*, 1988. 25~30

Measurement Analysis of Atmospheric Aerosol Aerodynamics Size with APD Detector

Lian Yue, Liu Wenqing, Zhang Tianshu, Liu Jianguo

Key Lab. of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031

Received date: 2004-09-23

Abstract Measurement analysis of atmospheric aerosol with APD detector was described. Atmospheric particles went through laser beam which was scattered. The scattering light of particles through two parallel laser beams was detected by an APD (avalanche photoelectric diode) detector, by forming a double-peaks signal, and the fly-time of the particles was obtained. The instrument was calibrated with standard particles. It can be used to measure the size distribution of atmospheric aerosol particles. The standard spectrum was obtained by analyzing the experimental data of different size particles, and measured the atmospheric aerosol particles and standard particles. The experiment results agreed with the theory very well.

Keywords Aerosol; Time of flight; APD; Particle size



Lian yue was born in 1974 in Jilin Province. He obtained his Bachelor and Master's Degree from Liaoning Technical University. Now he is studying for PhD in Key Lab. of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His research interests include atmospheric aerosol and optical instrument.