

文章编号: 1001-3806(2007)04-0360-04

用粒子计数法测量颗粒物质量浓度

顾 芳, 杨 娟, 卞保民, 贺安之*

(南京理工大学 信息物理与工程系, 南京 210094)

摘要: 为了测量颗粒物的质量浓度, 基于米散射理论, 在偏振入射光条件下, 通过数值计算研究了球形颗粒的散射光通量与粒径之间的关系, 得到了利用光学粒子计数器测量颗粒物质量浓度的计算公式。该公式重点考虑了粒子数目和大小对质量浓度的影响。实验结果表明, 在 $0.001\text{mg}/\text{m}^3 \sim 2\text{mg}/\text{m}^3$ 的质量浓度范围内, 该公式的计算值与实验测量值具有显著的相关性, 相关系数为 0.9953。

关键词: 散射; 质量浓度; 粒子计数器; 颗粒物

中图分类号: O436.2 **文献标识码:** A

Measurement of particle mass concentration using particle counter method

GU Fang, YANG Juan, BIAN Baomin, HE Anzhi

(Department of Information Physics and Engineer, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to measure the mass concentration of particulate matter, according to Mie scattering theory, the relationship between scattered light flux and spherical particle diameter was discussed under the condition of polarized light input, then the formula was attained for calculating particle mass concentration by means of optical particle counter. And particle size distribution was considered using the formula to calculate mass concentration. The experimental results indicate that, in the range of $0.001\text{mg}/\text{m}^3 \sim 2\text{mg}/\text{m}^3$, calculated mass concentration by the formula and measured mass concentration by a photometer (TSI SDEPAK AM510) are highly correlated, the correlation coefficient is 0.9953.

Key words: scattering; mass concentration; particle counter; particulate matter

引 言

空气中悬浮的颗粒物易进入人体呼吸道, 粒径越小, 对人体健康危害越大^[1]。因而, 我国第一部《室内环境质量标准》(GB/T18883-2002)对室内可吸入颗粒物(空气动力学直径大于或等于 $10\mu\text{m}$ 的颗粒物)提出了质量浓度日平均值小于等于 $0.15\text{mg}/\text{m}^3$ 的要求。另外, 对生产环境洁净度要求高的电子、医药及食品等行业也迫切需求颗粒物检测仪器。因此, 对如何测量颗粒物质量浓度的研究就显得很有必要。

目前, 颗粒物质量浓度测定方法有^[2~4]: 滤膜称重法、光散射法、压电晶体法及微量振荡天平法等, 其中光散射法因具有测量精度高、速度快、可用于在线测量等优点, 而受到了广泛应用^[5]。光散射法又分为颗粒群法和单粒子法, 基于单粒子光散射的粒子计数法简单可靠, 适用于低浓度场所的测量, 国内已有产品主要包括北京新技术研究所引进日本技术组装的 P-5L₂ 光

散射粉尘仪和 LD-1 型激光粉尘仪。两种型号的粉尘仪都以每分钟脉冲数(粒子数)表示相对质量浓度, 再与滤膜称重法比较得到质量浓度, 但这种测量方法忽略了颗粒大小对质量浓度的影响。最近, YAN 等人^[6]利用粒子计数器对大气进行长期监测, 给出了质量浓度低于 $1\text{mg}/\text{m}^3$ 时粒子数与质量浓度之间的经验计算公式, 然而并未从理论上对公式加以说明。

作者通过对球形颗粒散射光通量与粒径关系的数值计算, 导出了粒子计数器输出的电压脉冲与粒径之间的关系, 并利用粒子计数器测量的电压脉冲信号幅度分布, 得到了同时考虑粒子数目和大小的颗粒物质量浓度计算公式。实验结果表明, 在 $0.001\text{mg}/\text{m}^3 \sim 2\text{mg}/\text{m}^3$ 的质量浓度范围内, 该公式的计算值同实验测量值吻合较好。

1 粒子计数器测量颗粒的光散射理论

如图 1 所示, 当直径为 D 的颗粒通过激光照射的测量光敏区时, 颗粒会散射入射的激光, 在 90° 采光角方向放置一块球面反射镜收集粒子的散射光强, 再将收集到的散射光强转换成电压脉冲信号, 经前置放大、多通道计数, 最终得到粒子计数器测量的电压脉冲信

作者简介: 顾 芳 (1981-), 女, 博士研究生, 主要从事颗粒测试和光学传感器技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: haz@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2006-06-23; 收到修改稿日期: 2006-11-14

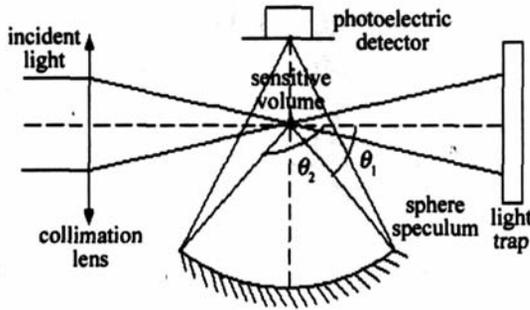


Fig 1 Diagram of optical particle counter

号幅度分布。若不计测量系统的本底噪声,测量的电压脉冲个数即为粒子个数,电压脉冲信号幅度反映了颗粒光学等效粒径的大小。

由米散射理论知,若入射光为完全偏振光,球形颗粒的散射光强 I_s 可表示为^[7]:

$$I_s = \frac{\lambda^2 I_0}{4\pi^2 r^2} [i_1(\theta, n, D, \lambda) \sin^2 \phi + i_2(\theta, n, D, \lambda) \cos^2 \phi] \quad (1)$$

式中, λ 为入射光波长, n 为颗粒相对周围介质的折射率, r 为散射光观察点与颗粒的距离, θ 和 ϕ 分别为散射角和方位角, I_0 为入射光强度, $i_1(\theta, n, D, \lambda)$ 和 $i_2(\theta, n, D, \lambda)$ 为散射光的强度函数^[8]。

对如图 1 所示的侧向 90° 采光系统, 球面反射镜收集到的颗粒散射光通量 F 是对一定立体角 Ω 内散射光强的积分^[7]:

$$F = \int_{\Omega} I_s d\Omega = \frac{\lambda^2 I_0}{4\pi^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\phi_0}^{\phi} \frac{i_1 + i_2}{2} \sin\theta d\theta d\phi + \frac{\lambda^2 I_0 \cos(2\phi_0)}{4\pi^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{i_1 - i_2}{2} \sin\theta \sin\theta d\theta \quad (2)$$

式中, 立体角对应的散射角范围为 $\theta_1 \sim \theta_2$, $\theta_1 + \theta_2 = 180^\circ$, $\phi_0 = 90^\circ$, 则:

$$\phi = 2 \cos^{-1} \left[\frac{\cos\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}\right) - \cos\left(\frac{\theta_2 + \theta_1}{2}\right) \cos\theta}{\sin\left(\frac{\theta_2 + \theta_1}{2}\right) \sin\theta} \right] = 2 \cos^{-1} \left[\frac{\cos\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}\right)}{\sin\theta} \right] \quad (3)$$

2 颗粒物质量浓度的计算公式

为了得到粒子计数器输出的电压脉冲 V 与被测颗粒光学等效粒径 D 之间的关系, 首先根据 (2) 式对不同折射率的球形颗粒做数值计算, 结果如图 2 所示。当入射光波长 $\lambda = 650\text{nm}$, 在侧向采光角 $90^\circ \pm 60^\circ$ 范围内, 折射率一定时球形颗粒散射光通量 F 与粒径 D 之间有好的单值对应关系, 但对折射率不同而粒径相同的颗粒, 散射光通量在大粒径范围内有差异, 而在小

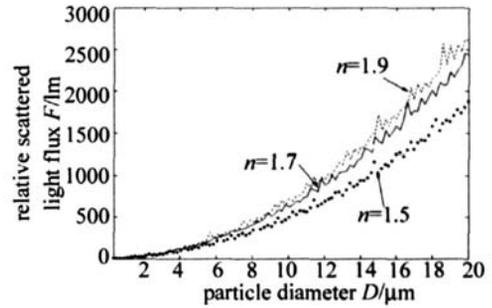


Fig 2 Relationship between scattered light flux and particle diameter for various refractive indices

粒径范围内几乎一致, 所以, 折射率会给大颗粒粒径的测量带来偏差。其次由拟合曲线可以看出, 折射率一定时球形颗粒散射光通量 F 与 D^2 成明显的线性关系, 拟合直线方程如图 3 所示。又由于粒子计数器的

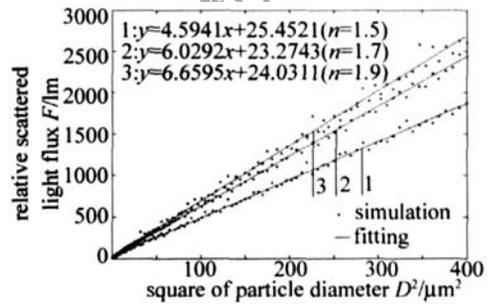


Fig 3 Relationship between scattered light flux and square of particle diameter for various refractive indices

光电探测器输出的电压脉冲信号 V 是由颗粒散射光通量 F 转换得到的, 因而, V 与 D^2 同样满足线性关系。通常被测颗粒群中各个颗粒的折射率未知, 若不计折射率对大颗粒的影响, 近似取 $V = AD^2$, 其中 A 是常系数。

另一方面, 空气中的颗粒是由许多大小不同的颗粒组成, 设这些颗粒都为球形颗粒且密度为 ρ , 若已知单位体积内直径为 D_i 的颗粒有 N_i 个, 则大气总悬浮颗粒物的质量浓度和空气动力学直径 $\leq 10\mu\text{m}$ 的颗粒物的质量浓度分别可表示为:

$$C = \frac{\pi}{6} \rho \sum_i N_i D_i^3 \quad (4)$$

$$P = \frac{\pi}{6} \rho \sum_i N_i D_i^3, (D_i \leq 10\mu\text{m}) \quad (5)$$

因实验中所用粒子计数器有 256 个电压通道, 所以实际粒径范围被划分成 256 个粒径档, 即 i 的取值范围为 1~256。再利用各通道的电压 $V = AD^2$ 得到 $D = (V/A)^{1/2}$, 代入 (4) 式导出颗粒物质量浓度 C 的计算公式:

$$C = k \sum_{i=1}^{256} N_i V_i^{3/2} \quad (6)$$

式中, k 为比例常数, 需标定得到, N_i 为 i 通道的脉冲数 (粒子数), V_i 为 i 通道的脉冲信号电压, 它反映了颗粒光学等效粒径的大小。可见, 利用 (6) 式计算的颗粒物质量浓度, 同时考虑了颗粒的数目和大小。

3 实验仪器和结果分析

3.1 测试条件及仪器

实验的测试对象为样品烟尘,使用的仪器主要包括激光尘埃粒子计数器(optical particle counter, OPC)、美国 TSI公司智能防爆粉尘仪 SDEPAK AM510及 Tektronix公司的数字荧光示波器。其中, SDEPAK AM510采用 90°直角接受颗粒散射光,利用内置气泵将颗粒吸入光学室内,再由光的散射量来测量粉尘的浓度,该仪器测量的粉尘质量浓度范围为 0.001mg/m³~20mg/m³,采样流量 Q = 1.7L/min,可实时显示粉尘浓度并存储数据。

3.2 粒子计数器测量的颗粒数目浓度上限

粒子散射光的电压脉冲宽度与光敏区宽度、粒子经过光敏区的速度有关,利用示波器记录粒子散射光脉冲的形状,计算了 OPC测量的粒子个数浓度上限。激光尘埃粒子计数器光敏区的宽度约 0.4mm,采样流量 Q = 2.8L/min,气流管道直径 d = 1.2mm,则采样气流速度为:

$$v = \frac{Q}{\pi d^2 / 4} = \frac{2.8 \text{ L/min}}{\pi \times 0.36 \times 10^{-6} \text{ m}^2} \approx 41 \text{ m/s} \quad (7)$$

再由光敏区的宽度知粒子通过光敏区所花时间约为 10μs,在采样速度一定的情况下,可以估算出粒子计数器测量的颗粒数目浓度上限为 10000颗/s。实验中在最大质量浓度量程时,每秒的粒子计数值约为 4000颗,因而在光敏区同时出现两个粒子的几率很小。

3.3 实验结果分析

OPC和 SDEPAK AM510同时测量样品烟尘,测量周期为 1min。SDEPAK AM510测量的颗粒物质量浓度为 C_{TSI},OPC测量得到的是颗粒物在一个周期内 256个通道的电压脉冲信号幅度分布。在 0.001mg/m³~2mg/m³的质量浓度范围内,归一化后的电压脉冲信号幅度分布如图 4所示。可以看出,对于给定的样品,若只改变质量浓度,则样品中各种粒径的粒子所占粒子总数的百分比基本不变。

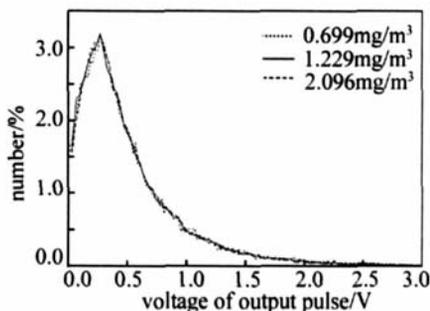


Fig 4 Normalized distribution of output voltage pulse signal for various mass concentration

根据两台仪器的测量值,利用(6)式计算了不同质量浓度下的比例常数 k,给出了 k值的标准偏差和相对标准偏差,具体见表 1,可以看出不同质量浓度下

Table 1 k value for various mass concentration

C _{TSI} /(mg/m ³)	k	C _{TSI} /(mg/m ³)	k	C _{TSI} /(mg/m ³)	k
0.086	0.0019	0.729	0.0020	1.272	0.0022
0.126	0.0019	0.760	0.0020	1.379	0.0021
0.166	0.0019	0.813	0.0021	1.418	0.0021
0.242	0.0018	0.947	0.0022	1.667	0.0021
0.359	0.0018	0.987	0.0021	1.736	0.0020
0.385	0.0018	1.053	0.0021	1.824	0.0019
0.560	0.0020	1.133	0.0021	1.836	0.0020
0.598	0.0020	1.195	0.0021	2.020	0.0019
0.623	0.0021	1.229	0.0021	2.096	0.0019
0.699	0.0021				
mean of k				0.0020	
standard deviation of k				0.00012	
relative standard deviation of k				6%	

k值基本一致,相对标准偏差仅 6%,因此将 k的平均

值代入(6)式得到 $C = 0.0020 \sum_{i=1}^{256} N_i V_i^{3/2}$ 。再利用 OPC 测量得到的信号幅度分布,计算出颗粒物质量浓度 C_{OPC}。图 5是 C_{TSI}和 C_{OPC}的关系图,+表示两者确定的

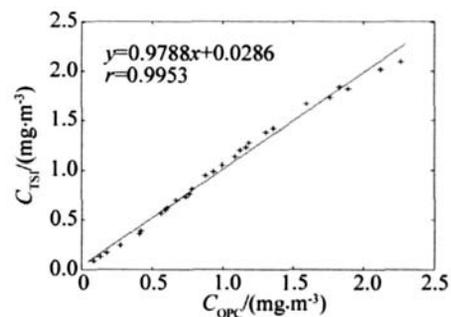


Fig 5 Plot of measured mass concentration by SDEPAK AM510 vs calculated mass concentration by OPC

数据点,从这些数据点的分布可以看出 C_{TSI}和 C_{OPC}存在明显的线性关系,故用最小二乘法进行线性拟合,拟合直线及方程见图 5,再由下式计算出两者的相关系数 r=0.9953:

$$r = \frac{\sum_{j=1}^{28} (C_{OPC,j} - \bar{C}_{OPC}) (C_{TSI,j} - \bar{C}_{TSI})}{\sqrt{\sum_{j=1}^{28} (C_{OPC,j} - \bar{C}_{OPC})^2 \sum_{j=1}^{28} (C_{TSI,j} - \bar{C}_{TSI})^2}} \quad (8)$$

并利用多元统计分析理论来检验 C_{TSI}和 C_{OPC}成线性关系的可靠性^[9],当显著水平 α = 0.01时,查 F分布表得 F_{1,26}(0.01) = 7.72,由 F(1,26) = 2767.16知 F(1,26) ≫ F_{1,26}(0.01),可见回归效果是高度显著的,说明}}

将 C_{TSI} 和 C_{OPC} 作线性关系拟合,判错率不大于 1%。

此外,由光散射理论知,颗粒的散射光强与被测颗粒的折射率、形状、颜色等特性有关,且空气湿度对颗粒物质量浓度的测量也有较大影响,尤其是相对湿度大于 50% 时^[10]。因此,利用光散射法测量颗粒物质量浓度,仪器需用标准粒子标定。如果由于气候和地区不同导致被测颗粒物与标定粒子的特性存在较大差异,还要对比例系数 k 作适当修正。

4 结 论

在偏振入射光条件下,基于米散射理论的数值计算表明在侧向采光角 $90^\circ \pm 60^\circ$ 范围内,球形颗粒的散射光通量 F 与粒径 D 之间有好的单值对应关系。进一步由曲线拟合得到 F 与 D^2 成线性关系,从而导出粒子计数器输出的电压脉冲 v 与 D^2 近似成正比。再利用光学粒子计数器测量的电压脉冲信号幅度分布,得到了颗粒物质量浓度的计算公式,并给出了公式中比例常数 k 的测定方法。实验表明,在 $0.001\text{mg}/\text{m}^3 \sim 2\text{mg}/\text{m}^3$ 的质量浓度范围内,该公式的计算值与实验测量值具有显著的相关性,相关系数为 0.9953。

参 考 文 献

[1] NORBERT E. Fine particles and human health—a review of epidemiological studies [J]. *Toxicology Letters*, 2004, 149 (2): 235~242.

- [2] CHUENTA W, HOPKE P K. Beta gauge for aerosol mass measurement [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2001, 35 (4): 840~843.
- [3] SOUTAR A, WATT M, CHERRIE J W *et al*. Comparison between a personal PM10 sampling head and the tapered element oscillating microbalance (TEOM) system [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33 (27): 4373~4377.
- [4] GMITERKO A, SLOSARCIK S, DOVICA M. Algorithm of nonrespirable dust fraction suppression using an optical transducer of dust mass concentration [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1998, 47 (5): 1228~1233.
- [5] SHENG D R. Research on evaluation of air-solid two phase particle distribution and mean concentration by laser scattering [J]. *Laser Technology*, 2000, 24 (3): 163~166 (in Chinese).
- [6] YAN F Q, HU H L, YU T. Measurement of particulate mass concentrations and atmospheric visibility with an optical particle counter [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2004, 21 (1): 98~102 (in Chinese).
- [7] GAO Y F, ZOU L X, HUANG H J *et al*. Influence of the light source in airborne laser particle counter on the flux of transducer [J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, 26 (3): 45~49 (in Chinese).
- [8] BOHTEN C F, HUFFMAN D R. Absorption and scattering of light by small particles [M]. New York: John Wiley & Sons, 1983. 1~533.
- [9] ZHU D Y, WU Ch O, QN W L. Multiple statistical analysis and software SAS [M]. 2nd ed, Nanjing: Southeast University Press, 2003. 257~270 (in Chinese).
- [10] SDUTAS C, KM S, CHANGM Ch *et al*. Field evaluation of a modified DataRAM MIE scattering monitor for real-time PM2.5 mass concentration measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34 (28): 4829~4838.

(上接第 359 页)

温度效应测量单轴晶体最大双折射率随温度变化的方法,只要精确调整仪器,并注意控制好实验所需温度,其测量结果是可靠的。

参 考 文 献

[1] FENG W W, SONG L K, CHEN L G. The study of the relation between circularly polarized light's refractive rate and wavelength [J]. *Laser Technology*, 2004, 28 (6): 639~641 (in Chinese).

[2] WANG W Sh, XU B, ZHANG J. The principle formula error of measuring the refractive index by the method of minimum deviation angle and the method of V-prism [J]. *Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*, 1995, 18 (1): 5~9 (in Chinese).

[3] XIE K Ch, LIU G Y. Measuring the refractivity of glass materials using laser interference [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 1994, 16 (5): 57~60 (in Chinese).

[4] XU Y Q, SONG L K, ZHAO P T. Birefringence measurements of mus-

- covite mica with wavelength modulation compensation method [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (1): 99~100 (in Chinese).
- [5] LI H X, WU F Q, SU F F. The effect of temperature on the polarizing prism [J]. *Laser Technology*, 2004, 28 (3): 266~270 (in Chinese).
- [6] LAO Y B. Polarized optics [M]. Beijing: Science Press, 2003. 101 (in Chinese).
- [7] SHEN W M, ZHANG Y, JIN Y X *et al*. Theoretical and experimental study on the interference of convergent polarized light for a biaxial crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25 (11): 1558~1562 (in Chinese).
- [8] JIN G F, LI J Zh. Laser measurement [M]. Beijing: Science Press, 1998. 229~234 (in Chinese).
- [9] ZHAO Sh, WU F Q. Theoretic analysis of uniaxial optical axis interference patterns [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, 3 (5): 59~61 (in Chinese).
- [10] LI J Zh. Handbook of optics [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1990. 502 (in Chinese).