

文章编号: 0258-7025(2002)12-1117-05

# 尘埃粒子的半导体激光散射测量

黄惠杰, 赵永凯, 任冰强, 程兆谷, 杜龙龙, 路敦武

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**提要** 以半导体激光为光源, 建立了一个可以实时测量空气中尘埃粒子的尺寸与颗粒数浓度的光学系统。根据 Mie 散射理论, 计算了该光学系统的光散射响应特性。实验结果表明, 该系统具有高的计数准确度、计数效率和计数重复性, 适用于洁净度检测和环境空气中尘埃粒子的粒径分布测量。

**关键词** 光散射, 粒子尺寸测量, 粒子浓度测量

中图分类号 O 436.2 文献标识码 A

## Aerosol Particle Measurement by Laser Diode Light Scattering

HUANG Hui-jie, ZHAO Yong-kai, REN Bing-qiang,

CHENG Zhao-gu, DU Long-long, LU Dun-wu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** A laser diode based optical system which can measure aerosol particle size and concentration is described in this paper. The light scattering response characteristics of the system are calculated based on Mie light scattering theory. Some experimental results show that the system has high counting accuracy, efficiency and reproducibility, and suitable for verification of cleanliness class and measurement of ambient aerosol size distribution.

**Key words** light scattering, particle size measurement, particle concentration measurement

## 1 引 言

基于尘埃粒子在光束中产生的散射现象为原理的光学尘埃粒子计数器, 因其可实时测量空气中尘埃粒子的尺寸和颗粒数浓度, 所以在洁净环境洁净度检测、空气悬浮颗粒物监测、气溶胶研究等方面得到广泛应用<sup>[1~5]</sup>。随着激光器的不断发展, 光学尘埃粒子计数器的光源由最初的白炽灯、气体激光器(主要是 He-Ne 激光器), 发展到了现在的半导体激光器。光源的不断更新促进了光学尘埃粒子计数器性能的不断提高, 尤其是半导体激光器的应用, 不仅使光学尘埃粒子计数器的探测灵敏度、计数效率、可靠性等技术指标得到了大幅度的提高, 同时也使其向着小型化、甚至微型化的方向发展。

本文报道以半导体激光器为光源而建立的激光尘埃粒子计数器的光学系统, 根据 Mie 散射理论计

算了该系统的光散射响应特性, 并实测了该系统的主要技术指标。

## 2 光学系统

光学尘埃粒子计数器的光学系统主要由照明系统、散射光收集系统和气路系统组成, 三者的相交区域为光敏感区。我们设计的光学系统如图 1 所示, 这是一个直角散射光学系统, 即照明系统光轴、散射光收集系统光轴和气路系统轴线相交于光敏感区中心且两两垂直。直角散射光学系统因可以很好地阻止来自照明系统的杂光进入散射光收集系统而获得较高的信噪比, 所以在光学尘埃粒子计数器中应用较多<sup>[6~8]</sup>。

照明系统主要由半导体激光器、准直镜、柱面聚焦镜和光陷阱组成。半导体激光器发出的激光束经

收稿日期: 2001-09-17; 收到修改稿日期: 2001-12-18

作者简介: 黄惠杰(1966—), 男, 江苏通州人, 研究员, 硕士, 主要从事激光应用工程与仪器研究。E-mail: ldwsiofm@mail.

准直镜准直后,被柱面聚焦镜一维聚焦于光敏感区,焦线位于照明系统光轴和散射光收集系统光轴组成的平面内,且垂直于气流方向。激光束穿过光敏感区后进入光陷阱,并被光陷阱吸收掉。散射光收集系统主要由球面反射镜、聚焦镜、矩形光阑和光电倍增管组成。球面反射镜作为收集散射光的主接收镜,其焦点与光敏感区中心重合。矩形光阑可以滤除光敏感区外的杂光。被测尘埃粒子流过光敏感区

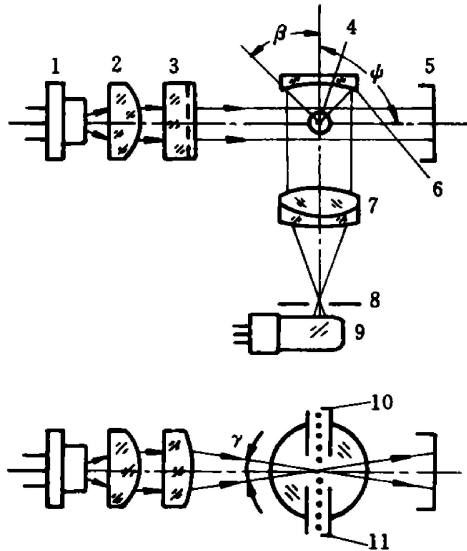


图 1 光学系统原理图

1: 激光二极管; 2: 准直透镜; 3: 柱面聚焦镜; 4: 探测区; 5: 光陷阱; 6: 球面镜; 7: 聚焦透镜; 8: 矩形光阑; 9: 光电倍增管; 10: 气溶胶入口; 11: 气溶胶出口

Fig. 1 Diagram of the laser-diode based optical system

1: laser diode; 2: collimation lens; 3: cylindrical focusing lens; 4: sensitive volume; 5: light trap; 6: spherical mirror; 7: focusing lens; 8: rectangular field slit; 9: photomultiplier tube; 10: aerosol inlet; 11: aerosol outlet

表 1 光学系统主要技术参数

Table 1 Parameters of the optical system

Light source	10 mW laser diode at 650 nm
Cylindrical focusing lens	$f' = 70$ mm, DOF = 1.6 mm
Collecting aperture half angle $\beta$	$44^\circ$
Inclining angle between illumination and collecting axes $\phi$	$90^\circ$
Scattering angle $\theta$	$46^\circ \sim 134^\circ$
Curvature radius of spherical mirrors	20 mm
Sensitive volume	$1.6$ mm $\times$ $1.6$ mm $\times$ $0.023$ mm

增管组成。球面反射镜作为收集散射光的主接收镜,其焦点与光敏感区中心重合。矩形光阑可以滤除光敏感区外的杂光。被测尘埃粒子流过光敏感区

时产生与其尺寸成比例的散射光,一定立体角范围内的散射光被球面反射镜反射后变成平行光,经聚焦镜聚焦于矩形光阑处,穿过矩形光阑后进入光电倍增管,光电倍增管输出一个幅度与粒子尺寸成比例的脉冲信号,经后续电路放大、甄别、计数后得到被测空气中各种粒径尘埃粒子的颗粒数浓度。为了保证采样气流中的所有粒子通过光敏感区而不被漏测,进气嘴出口的直径应小于光敏感区激光焦线长度,且在采样气流外加上了环形洁净气套。表 1 给出本光学系统的主要技术参数。

### 3 计算结果

一般情况下,光学尘埃粒子计数器的光学系统对于直径为  $d$  的单个均匀球形粒子的散射光通量正比于下式<sup>[9,10]</sup>

$$R(m, \alpha) = \iiint \lambda^2 / 8 \pi^2 [i_1(\alpha, m, \theta) + i_2(\alpha, m, \theta)] E(\lambda) S(\lambda) F(\theta, \phi) d\lambda d\theta d\phi \quad (1)$$

式中,  $m$  为粒子的复折射率,虚部表示粒子对入射光有吸收;  $\alpha = \pi d / \lambda$  为粒子的尺寸参数;  $\theta$  为散射角,是散射光线相对于照明光线的夹角;  $i_1(\alpha, m, \theta)$  和  $i_2(\alpha, m, \theta)$  是  $\theta$  角方向上的 Mie 散射强度函数,分别表示平行于和垂直于照明系统光轴和散射光收集系统组成的平面的两个偏转分量;  $E(\lambda)$  和  $S(\lambda)$  分别为光源的光谱强度和光电探测器的光谱灵敏度;  $F(\theta, \phi)$  是光学系统的几何结构因子,与照明系统和散射光收集系统的结构形式有关,  $\phi$  为照明光线与散射光收集系统光轴的夹角,对于照明系统光轴与散射光收集系统光轴夹角为  $\phi$  的侧向式散射光收集系统,  $F(\theta, \phi) = 4 \sin \theta \cos^{-1} [(\cos \beta - \cos \theta \cos \phi) / \sin \theta \sin \phi] \cos^{-1} [(\cos \gamma - \cos \theta \cos \phi) / \sin \theta \sin \phi]$ ,  $\gamma$  和  $\beta$  分别为照明系统与散射光收集系统的孔径半角,参见图 1。

本文描述的光学系统的照明光束以柱面镜一维聚焦,且孔径半角只要  $1.6^\circ$ ,可认为这是一个在单色平面波照明下的直角散射光学系统( $\phi = 90^\circ$ )。因此式(1)可以简化为

$$R(m, \alpha) = (\lambda^2 / 8 \pi^2) \int [i_1(\alpha, m, \theta) + i_2(\alpha, m, \theta)] F(\theta, \phi) d\theta \quad (2)$$

其中

$F(\theta, \phi) = 2 \sin \theta \cos^{-1} [(\cos \beta - \cos \theta \cos \phi) / \sin \theta \sin \phi]$ 。  
 $i_1(\alpha, m, \theta)$  和  $i_2(\alpha, m, \theta)$  是复杂的 Legendre 多项

式和 Bessel 函数的无穷级数, 在计算中采用文献 [10] 的子程序, 其中假设级数展开式是均匀收敛的, 这样只要计算到级数展开式的第  $N_c$  项后, 计算引起的误差足够小, 而  $N_c$  为与  $(\alpha + 4\alpha^{1/3} + 2)$  最接近的整数。我们计算了上述光学系统对于几种材料的球形粒子的散射光通量与粒径的关系曲线, 如图 2 所示。选用的 5 种材料通常被用于光学尘埃粒子计数器的标定或在实际测量中常常遇到, 它们分别是: 聚苯乙烯 (polystyrene latex, PSL, 复折射率  $m = 1.585 - 0i$ ), 二甲酸 (dioctyl phthalate, DOP,  $m = 1.49 - 0i$ ), 碳 (carbon,  $m = 1.95 - 0.66i$ ), 煤 (coal,  $m = 1.53 - 0.5i$ ), 水 (water,  $m = 1.33 - 0i$ )。

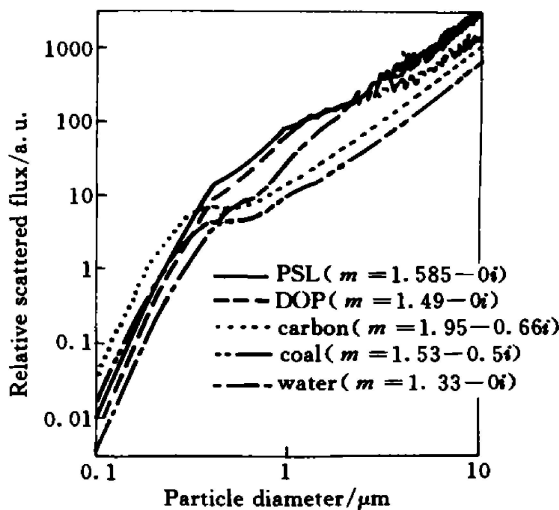


图 2 几种材料的球形粒子的散射光通量与粒径的关系曲线

Fig. 2 Theoretical scattered light flux to particle diameters of some refractive indices

从图 2 曲线可知: 1) 光学系统的光散射特性强烈地依赖于粒子材料。对于非吸收型的透明粒子, 在  $d < 1.1 \mu\text{m}$  区域散射光通量随着粒径的增大而单调上升, 而当  $d > 1.1 \mu\text{m}$  后, 散射光通量与粒径的关系曲线存在振荡性, 这表明本光学系统对小粒子的探测分辨率较高, 而对大粒子的探测分辨率低; 对于吸收型粒子, 曲线光滑, 在所计算的  $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$  粒径范围内散射光通量随着粒径的增大而单调上升, 这表明在探测吸收型粒子时在所关心的粒径范围内均可获得较非吸收型粒子高的分辨率。2) 小粒子区域 ( $d < 0.6 \mu\text{m}$ ) 的曲线斜率大于大粒子区域 ( $d \geq 0.6 \mu\text{m}$ ) 的曲线斜率, 这也表明在探测小粒子时可以获得较大粒子高的分辨率。3) 不同材料的相同粒径的粒子的散射光通量不相等。在  $d$

$< 0.3 \mu\text{m}$  区域, 吸收型粒子的散射光通量大于相同粒径的非吸收型粒子的散射光通量; 在  $0.3 \sim 0.6 \mu\text{m}$  之间是一个过渡区域; 在  $d > 0.6 \mu\text{m}$  区域, 吸收型粒子的散射光通量反而小于相同粒径的非吸收型粒子的散射光通量, 而且散射光通量的差别比小粒径区域大。4) 在未知被测粒子材料和形状的情况下, 所测得的粒子尺寸不能认为是被测粒子的实际尺寸, 而应该是光学等效粒径, 即当被测粒子产生的散射光与光学尘埃粒子计数器标定时所用的某种材料的某一粒径的球形粒子相同, 则认为被测粒子具有与该球形粒子在光学上等效的粒径。一般情况下, 光学尘埃粒子计数器采用聚苯乙烯球形粒子标定, 所以由其测得的粒径实际上是聚苯乙烯球形粒子的光学等效粒径。这个概念在洁净环境洁净度监测中普遍采用<sup>[11]</sup>。

## 4 实验结果与讨论

根据计算结果及实际测量所需, 将上述光学系统设定为 6 个粒径通道:  $0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0, 5.0 \mu\text{m}$ , 空气采样流量为  $2.83 \text{ L/min}$  ( $0.1 \text{ ft}^3/\text{min}$ )。对粒径分别为  $0.532, 0.72, 1.53 \mu\text{m}$  的 3 种单分散 PSL 球形粒子进行测量。测量时, 含有 PSL 球形粒子的悬浊液经美国 PMS 公司 PG-100 型粒子发生器雾化、干燥后, 由进气口吸入, 穿过光敏感区后, 从出气口排出。连续测量 10 次, 每次测量时间  $1 \text{ min}$ , 取 10 次平均值。测量结果见表 2。

### 4.1 计数准确度与计数效率

计数准确度定义为落在相邻粒径通道区间内的粒子数在总粒子数中所占的比例, 计数效率定义为测量到的粒子数与实际进入仪器的粒子数之比值。在实际测量中, 计数效率通常以大于和等于相应粒径通道的粒子数在总粒子数中所占的比例来表示<sup>[11]</sup>。由计算结果可知, 对于 PSL 球形粒子, 由于  $0.3 \mu\text{m}$  粒子散射光通量分别是  $0.5 \mu\text{m}, 0.7 \mu\text{m}, 1.5 \mu\text{m}$  粒子的  $1/4.7, 1/9.6, 1/35.1$ , 所以将大于和等于  $0.3 \mu\text{m}$  粒径通道的粒子数作为每次测量的总粒子数。

表 2 结果令人满意, 因为绝大部分粒子被相应的粒径通道测量到。3 种粒子的计数准确度分别为  $77.5\%, 68.2\%$  和  $61.6\%$ , 计数效率分别为  $91.2\%, 68.9\%$  和  $62.4\%$ 。不同粒径粒子的计数准确度和计数效率存在着一定的差异, 主要原因是: 1) 实际的各粒径通道的甄别电位与理论计算不完全相同,

应根据实际测量结果作适当的调整。从实测结果看, 0.5 μm 和 0.7 μm 粒径通道的甄别电位需适当降低; 2) 在粒径通道设置上, 大粒子区域的通道间隔要大于小粒子区域。因为从计算结果知, 大粒子区域的光散射响应曲线的斜率小于小粒子区域, 大粒子区域的粒径分辨率较低; 3) 与所用的 PSL 球形粒子的尺寸均匀性有关, 上述测量结果也表明小粒子的尺寸均匀性优于大粒子。从洁净环境洁净度监测角度来看, 计数效率更有意义, 因为洁净度级别指单位体积空气中所含的大于和等于所指定粒径(通

常是 0.5 μm) 的尘埃粒子数<sup>[11]</sup>。

### 4.2 计数重复性

计数重复性定义为计数准确度的相对标准偏差<sup>[12]</sup>。对 0.532 μm 聚苯乙烯球形粒子连续测量 10 次, 每次测量时间为 1 min, 总粒子数(≥0.3 μm 的粒子数)和在 0.5~0.7 μm 之间的粒子数列于表 3。计算得计数准确度的平均值为 0.775, 标准偏差为 0.011, 相对标准偏差为 1.4%, 优于文献[12]所规定的 20% 的技术要求。

表 2 3 种聚苯乙烯球形粒子测量结果(粒子数/min)

Table 2 Measured results of PSL particles (particles/min)

PSL diameter/μm	Size channel/μm							
	≥0.3	0.3~0.5	0.5~0.7	0.7~1.0	1.0~2.0	2.0~5.0	>5.0	
0.532	11266	992	8734	1362	134	44	0	10274(≥0.5 μm)
0.72	7580	766	1592	5167	39	16	0	5222(≥0.7 μm)
1.53	3870	367	370	720	2385	28	0	2413(≥1.0 μm)

表 3 0.532 μm 聚苯乙烯球形粒子连续测量 10 次结果(粒子数/min)

Table 3 Ten successive measurement results of 0.532 μm PSL particle (particles/min)

Size channel /μm	Sample period No.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
≥0.3	11059	10995	11107	10980	10958	11417	11200	11469	11358	12093
0.5~0.7	8341	8363	8516	8595	8620	8955	8686	8979	8908	9377
Counting accuracy	0.754	0.761	0.767	0.783	0.787	0.784	0.776	0.783	0.784	0.775

### 4.3 环境空气中尘埃粒子的粒径分布测量

用本光学系统测量实验室环境空气中的尘埃粒子浓度与粒径的关系。连续测量 10 次, 每次测量时间为 1 min, 取 10 次平均值。将所得结果换算成每升空气中所含的大于和等于某一粒径档的粒子数, 见表 4。

表 4 环境空气中尘埃粒子浓度测量值

Table 4 Measured ambient aerosol size distribution

Size channel/μm	Measured concentration/particles/liter
≥0.3	117141
≥0.5	71545
≥0.7	45223
≥1.0	11083
≥2.0	3225
≥5.0	295

大量研究表明, 空气中的尘埃粒子按粒径的粒子数累积分布在双对数坐标图上近似为直线关系<sup>[13]</sup>

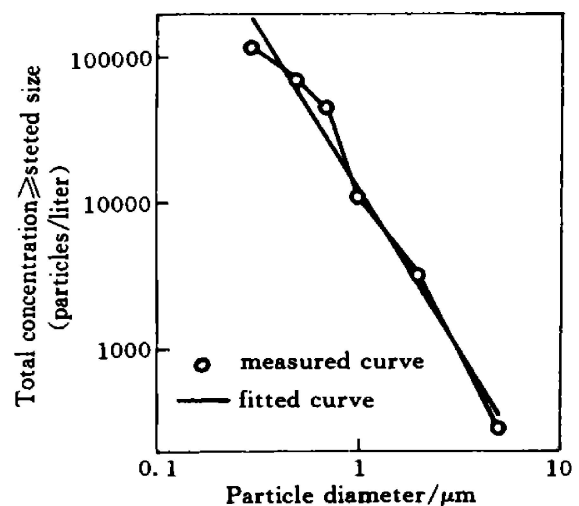


图 3 环境空气尘埃粒子粒径分布

Fig. 3 Ambient aerosol size distribution

$$N_{d1}/N_{d2} = (d_1/d_2)^{-n} \quad (3)$$

式中  $N_{d1}$  为粒径  $\geq d_1$  的粒子总数(粒子数/L),  $N_{d2}$  为粒径  $\geq d_2$  的粒子总数(粒子数/L),  $n$  为分布指



数。分布指数  $n$  一般在 2.0 ~ 2.3 变化。根据式(3), 利用最小二乘法将实测值进行拟合, 计算得  $n = 2.21$ 。实测曲线与拟合曲线见图 3。由图可见, 实测曲线非常接近于拟合所得直线, 这表明利用本光学系统测得的粒径分布结果能够很好地反映环境空气中尘埃粒子的实际粒径分布。

## 5 结 论

1) 建立了一套以半导体激光器为光源的用于实时测量空气中尘埃粒子的尺寸与颗粒数浓度的光学系统, 计算了几种材料的球形粒子的散射光通量与粒径的关系曲线。计算表明在利用光散射法测量尘埃粒子时引入光学等效粒径的必要性。

2) 对聚苯乙烯球形粒子的测量结果表明, 该光学系统具有很高的计数准确度、计数效率和计数重复性。如对甄别电位作适当调整, 将可获得更好的结果。

3) 对环境空气中尘埃粒子粒径分布的测量表明, 本光学系统不仅可以用于低粒子浓度洁净环境的洁净度测量, 而且可以用于研究环境空气中尘埃粒子的粒径分布情况。

## 参 考 文 献

- 1 J. Gebhart, P. Blankenberg, C. Roth. Counting efficiency and sizing characteristics of optical particle counters [C]. B. Y. H. Liu, D. Y. H. Pui, H. J. Fissan. *Aerosols*. New York: Elsevier, 1984. 7~ 10
- 2 W. C. Hinds, G. Kraske. Performance of PMS Model LAS-X optical particle counter [J]. *J. Aerosol Sci.*, 1986, **17**(1): 67~ 72
- 3 R. G. Knollenberg. The measurement of latex particle sizes using scattering ratios in the Rayleigh scattering size range [J]. *J. Aerosol Sci.*, 1989, **20**(3): 331~ 345
- 4 D. Bemer, J. F. Fabries, A. Renoux. Calculation of the theoretical response of an optical particle counter and its practical usefulness [J]. *J. Aerosol Sci.*, 1990, **21**(5): 689~ 700
- 5 S. English. Detecting contamination in the semiconductor processing is key for particle counters [J]. *Cleanrooms*, 1996, **10**(11): 25~ 32
- 6 Huijie Huang, Dunwu Lu, Lixin Zou *et al.*. A high efficiency optical sensor for optical particle counters [C]. *SPIE*, 1999, **3898**: 382~ 387
- 7 A. Lieberman. Royco instruments particle counters: capabilities and limitations [C]. D. A. Lundgren, F. S. Harris, W. H. Marlow *et al.*. *Aerosol Measurement*, Gainesville: University Press of Florida, 1979. 183~ 193
- 8 B. Y. H. Liu, R. N. Berglund, J. K. Agarwal. Experimental studies of optical particle counters [J]. *Atmospheric Environment*, 1974, **8**: 717~ 732
- 9 J. R. Hodgkinson, J. R. Greenfield. Response calculations for light scattering aerosol counters and photometers [J]. *Appl. Opt.*, 1965, **4**(11): 1463~ 1474
- 10 C. F. Bohren, D. R. Huffman. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1983, Chapter 4. 82 ~ 129; Appendix A, 477~ 482
- 11 US Federal Standard, FED-STD-209E, Airborne particulate cleanliness classes in cleanrooms and clean zones [S]. September 11, 1992
- 12 Verification regulation of dust particle counter [S]. JJG547-88, 1988 (in Chinese)
- 13 Xu Zhonglin. *Principles of Air Purifying Technology* [M]. Shanghai: Press of Tongji University, 1998. 61~ 69 (in Chinese)