

# 基于成像极化浊度计的颗粒粒径检测技术

潘新, 王章军\*, 孟祥谦, 王秀芬, 陈超, 邓伟, 刘兴涛, 李辉, 李先欣, 庄全凤

齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266001

**摘要** 根据米散射理论, 设计了以 532 nm 激光器为光源、CCD 为探测器的极化浊度计。对粒径为 2  $\mu\text{m}$  的聚苯乙烯标准粒子(PSL)进行检测, 得到了 PSL 的散射相函数, 将其与偏振角为 0° 和 90° 的 2  $\mu\text{m}$  球形粒子的理论散射相函数进行对比, 拟合度分别达到 87.3% 与 88.4%。采用 Chahine 迭代算法反演得到 PSL 的粒径为 1.94  $\mu\text{m}$ , 接近其真实值。将极化浊度计与宽范围颗粒粒径谱仪和扫描电镜的检测结果进行对比, 结果表明, 该装置检测精度高, 且不受人为主观因素影响, 对颗粒粒径的准确检测有重要意义, 在相关领域应用前景较好。

**关键词** 颗粒粒径; 电荷耦合器; 米散射; 散射相函数

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.092902

## Particle Size Detection Technology Based on Imaging Polarization Nephelometer

Pan Xin, Wang Zhangjun\*, Meng Xiangqian, Wang Xiufen, Chen Chao,  
Deng Wei, Liu Xingtao, Li Hui, Li Xianxin, Zhuang Quanfeng

*Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao, Shandong 266001, China*

**Abstract** According to the theory of Mie scattering, a polarization nephelometer composed of 532 nm laser as light source and charge-coupled device as detector was designed. Standard polystyrene latex (PSL) particles with particle size of 2  $\mu\text{m}$  was measured, and the scattering phase function of the PSL was obtained. Compared with the theoretical scattering phase function of 2  $\mu\text{m}$  spherical particles with polarization angle of 0° and 90°, the fitting degree was 87.3% and 88.4%, respectively. Chahine iteration algorithm was used to inverse the particle size of the PSL, the measured particle size was 1.94  $\mu\text{m}$ , which was close to the real particle size. The results of polar nephelometer were compared with those of wide range particle size spectrometer and scanning electron microscopy. The results show that the detection precision of the device is high and not affected by subjective factors. The device is of great significance for the accurate detection of particle size, which has good application potential in related field.

**Key words** particle size; charge-coupled device; Mie scattering; scattering phase function

**OCIS codes** 290.5850; 010.1310; 290.5820; 290.4020

## 1 引言

颗粒作为物质存在的主要形式之一, 构成了五彩斑斓的有机世界。随着科学技术的发展, 颗粒在化工、建筑、环保等领域的应用越来越广泛, 对颗粒粒径的准确检测是目前主要的技术难点<sup>[1]</sup>。粒径大小是颗粒的主要参数, 直接影响了其使用效果。颗粒粒径的检测手段逐渐成熟, 包括筛分法、沉降法和

显微镜法等传统方法, 这些方法操作简单, 但受人为主观因素影响大、准确度较低, 无法满足检测要求<sup>[2-4]</sup>。颗粒成像检测技术因具有精度高、可在线检测和操作简便等优点, 逐渐成为该领域的研究热点。胡森等<sup>[5]</sup>根据米散射理论, 利用 CCD 侧向激光雷达建立了 PM<sub>2.5</sub> 颗粒的检测系统; Chen 等<sup>[6]</sup>利用线阵 CCD 搭建了激光粒度仪, 对颗粒粒径进行了反演测量; Song 等<sup>[7]</sup>利用 CCD 探究了相对湿度对城市有

收稿日期: 2019-09-06; 修回日期: 2019-09-12; 录用日期: 2019-09-16

\* E-mail: zhangjun.wang@hotmail.com

机颗粒的影响;Mei等<sup>[8-9]</sup>搭建沙氏激光雷达,利用多波长技术对PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>等大气污染颗粒进行了观测;孟祥谦等<sup>[10]</sup>以水蒸气和氮气分别代表大、小粒子,通过成像极化浊度计进行了相关散射实验,实验结果与瑞利散射理论基本吻合。本文在此基础上利用极化浊度计以 CCD 成像的方式对粒径为2 μm的聚苯乙烯标准粒子(PSL)进行检测,保证高分辨率的同时还兼顾了检测的实时性。用散射相函数反演得到了 PSL 的粒径分布,并与宽范围颗粒粒径谱仪(WPS)和扫描电镜(SEM)的检测结果进行了对比,结果表明该装置的检测精度较高。

## 2 实验设备与方法

### 2.1 极化浊度计

实验设计的成像极化浊度计(IPN)原理如图1所示,发射端为一个线偏振的532 nm 半导体激光器,探测器为 CCD 和鱼镜头,探测器在侧面接收颗粒

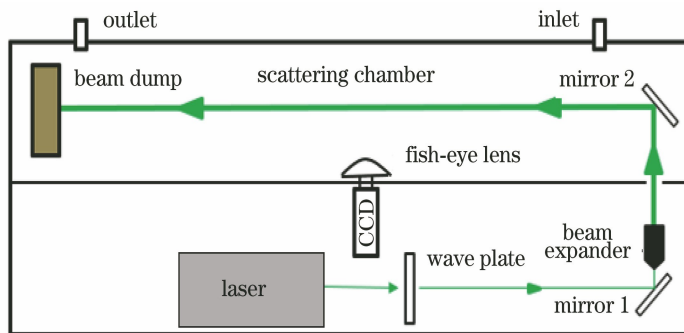


图1 极化浊度计装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of polarization nephelometer device

### 2.2 宽范围颗粒粒径谱仪

选用美国 MSP 公司生产的 WPS(1000XP)对2 μm的 PSL 粒径进行检测,该仪器由凝结核粒子计数器、激光粒子仪和微分电迁移率分析仪组成,粒径分析范围为5 nm~10 μm,激光器向 PSL 发射激光,产生散射光,散射光信号在弧度为20°~100°的球面镜内被光电倍增管收集,进而得到 PSL 的粒径范围。

### 2.3 扫描电镜

SEM 是介于透射电镜和光学显微镜之间的一种微型观察仪器,可对物品进行微观成像。实验采用的 SEM(Hitachi S-480)分别在不同倍数下观察 PSL,并分析其微粒特征。

### 2.4 实验方法

实验以美国杜克科技公司提供的直径为2 μm的 PSL(4K-02)为观测对象,将 PSL 置于气溶胶发

生器中,以去离子水为分散剂,使 PSL 样品雾化,形成气溶胶体系,用氮气将 PSL 吹入成像极化浊度计中进行检测。成像极化浊度计向 PSL 发射波长为532 nm 的激光,通过电机控制 1/2 波片,使激光以0°或90°的偏振态发射,利用 CCD 得到 PSL 的光谱图像,对散射光图像进行分析和反演,将实测的散射相函数与对应偏振角的理论散射相函数进行比较,得到 PSL 的粒径,并与 WPS 和 SEM 的检测结果进行对比,以验证该装置检测结果的准确性。

为避免强光散射引起 CCD 像元出现饱和,在光路中放置扩束镜,以增加散射光在 CCD 阵面成像的像元数量。由激光器发出光斑直径为5 mm 的线偏振激光,通过 1/2 波片改变光束的偏振方向,电机与 1/2 波片相连,通过程序驱动电机,带动波片转动,使激光以偏振角为0°或90°方向发射,经反射镜导入扩束镜,扩束后再通过反射镜进入接收系统。将制冷 CCD 与鱼镜头放在接收室侧壁,通过鱼镜头(观测范围为10°~70°)接收散射光束。为避免光束发射到接收室侧壁产生的杂散光影响观测结果,在光路终止处安装消光池,最后使用计算机控制 CCD 进行数据采集与处理。按图像中各像素代表的实际光束位置依次取出各角度的散射光数据序列,并对数据灰度值进行处理,提取到其光强分布,得到相关散射相函数,通过反演算法得到颗粒粒径分布,最后在计算机显示原始图像与处理结果,该装置可实时在线获取颗粒散射光图像,反演颗粒粒径分布。

生器中,以去离子水为分散剂,使 PSL 样品雾化,形成气溶胶体系,用氮气将 PSL 吹入成像极化浊度计中进行检测。成像极化浊度计向 PSL 发射波长为532 nm 的激光,通过电机控制 1/2 波片,使激光以0°或90°的偏振态发射,利用 CCD 得到 PSL 的光谱图像,对散射光图像进行分析和反演,将实测的散射相函数与对应偏振角的理论散射相函数进行比较,得到 PSL 的粒径,并与 WPS 和 SEM 的检测结果进行对比,以验证该装置检测结果的准确性。

### 2.5 数据处理

激光通过颗粒时,会发生吸收和散射两种现象。以直径为2 μm 的 PSL 为例,根据米散射理论对 PSL 样品的散射图像进行处理,得到其散射相函数。因粒子的粒径远大于入射光波长(532 nm),因此会发生米散射,样品室中的 PSL 在散射角为 $\theta$ ,与光源距离为 $d$ 处的散射光光强可表示为<sup>[11]</sup>

$$I(\theta, \lambda, \varphi) = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 d^2} I_0 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} [i_1(\theta) \sin^2 \varphi + i_2(\theta) \cos^2 \varphi] \cdot F(D) \cdot dD, \quad (1)$$

式中,  $D_{\max}$  和  $D_{\min}$  分别为 PSL 粒径的上限和下限,  $i_1$  和  $i_2$  分别为入射光强矢量垂直和平行于观测平面的强度分布函数,  $\lambda$  为激光波长,  $\varphi$  为散射光的偏振角,  $F(D)$  为 PSL 的粒径分布函数, 可将(1)式离散为

$$I(\theta_n, \lambda, \varphi) = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 d^2} I_0 \sum_{n=1}^N [i_1(\theta_n) \sin^2 \varphi + i_2(\theta_n) \cos^2 \varphi] \cdot F(D_n), \quad (2)$$

式中,  $N$  为离散的个数,  $\theta_n$  为散射角。建立入射光比值矩阵  $\mathbf{J}$

$$\mathbf{J} = \left[ \frac{I(\theta_1, \lambda, \varphi)}{I_0}, \frac{I(\theta_2, \lambda, \varphi)}{I_0}, \dots, \frac{I(\theta_N, \lambda, \varphi)}{I_0} \right]^T, \quad (3)$$

式中,  $I_0$  为入射光光强, 为方便计算建立散射系数矩阵  $\mathbf{T}$ , 其中的元素

$$t_n = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 d^2} [i_1(\theta_n) \sin^2 \varphi + i_2(\theta_n) \cos^2 \varphi]. \quad (4)$$

粒径分布函数组成的矩阵  $\mathbf{F}$

$$\mathbf{F} = [F(D_1), F(D_2), \dots, F(D_N)]^T. \quad (5)$$

可将(2)式表示为

$$\mathbf{J} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{T}. \quad (6)$$

由于系数矩阵  $\mathbf{T}$  为病态矩阵, 无法直接求解, 因此可通过独立模式算法或非独立模式算法来解决。相比非独立模式算法, 独立模式算法不需提前知道颗粒粒径分布信息。因此, 采用独立模式算法中的 Chahine 迭代算法对 PSL 粒径进行反演, Chahine 迭代算法精度高且迭代模式简单, 可满足本装置的检测要求。

设 PSL 的粒径分布列向量  $\mathbf{W}^{(0)}$  为初始值, 则

$$\mathbf{W}^{(k+1)} = \{ [\mathbf{T}' \cdot (\mathbf{E} / \mathbf{E}^{(k)})] ./ \text{sum}(\mathbf{T}) \} \cdot \mathbf{W}^{(k)}, \quad (7)$$

$$\mathbf{E}^{(k)} = \mathbf{T} \mathbf{W}^{(k)}, \quad (8)$$

式中,  $\mathbf{T}$  为散射系数矩阵,  $\text{sum}(\mathbf{T})$  为列向量累加的光强,  $\mathbf{E}$  为光强分布列向量,  $\mathbf{T}'$  为散射系数矩阵  $\mathbf{T}$  的转置矩阵,  $k$  为迭代次数, ‘./’ 表示将各向量元素对应相除, ‘.’ 表示将各向量元素对应相乘。

虽然 Chahine 迭代算法在颗粒粒径反演中应用广泛, 但该方法对噪声敏感、抗噪能力弱。因此需要使用去背景法和叠加平均法对图像进行校正, 去除噪声以保证算法的准确性。将 CCD 实时观测的 PSL 散射图像以 Tiff 格式储存, 通过 Matlab 软件从图像的灰度值中提取到其光强分布, 得到其散射

相函数, 并与  $2 \mu\text{m}$  颗粒理论散射相函数进行对比, 通过 Chahine 迭代算法反演得到粒子粒径及其粒径分布, 最后对检测结果的准确度进行检验。

## 3 结果与讨论

### 3.1 PSL 极化浊度计图像

使激光器以调制振幅的方式出光, 通过编写的颗粒散射光采集软件获取颗粒的实时散射图像, 用图像中各像素点的灰度值表示该点的散射光强度。图 2(a) 为大气气溶胶散射图像, 大气气溶胶产生的散射, 会对 PSL 的散射相函数产生一定的干扰。向样品室中由少到多再到饱和充入 PSL, 图 2(b) 为 PSL 低浓度时的散射图像, 与背景散射图像相比, 散射光强度明显增加, 且出现了明显的振荡现象, 结果与文献[14]相吻合[14], 此时可以认为样品室中已经存在 PSL。图 2(c) 为 PSL 高浓度时的散射图像, 与图 2(a) 相比, 像素点增多且同一像素点的灰度值也明显增大。这证明了 PSL 浓度增大时, 其引起的散射强度增加, 且波动现象更为明显, 振荡幅度更大。当散射图像基本不随时间变化时, 认为样品室中的 PSL 已达到饱和。从图 2(c) 中观测得到的灰度值矩阵伪彩图存在较多的背景噪声和热噪声, 周围也含有随机分布的散乱噪声信号, 会对检测结果的精度造成一定影响。因此需要通过去背景法与叠加平均法减弱噪声影响, 取 20 幅同一时间段图像灰度值矩阵的平均值, 以图 2(a) 观测的大气气溶胶散射图像为背景, 用 PSL 的平均灰度矩阵减去背景灰度矩阵, 得到图 2(d)。对比图 2(d)、图 2(c) 可以看出, 噪声信号的分布范围和密度都有明显减少, 且噪声信号光强大小也有所减少, 基本无较亮的噪声斑点, PSL 散射图像的背景噪声基本消失。利用去背景法与叠加平均法, 可有效去除自身热噪声和背景噪声, 对基于极化浊度计的 PSL 散射信号的有效提取有重要意义[12]。

### 3.2 WPS 数据

WPS 的检测结果如图 3 所示, 图 3(a) 为大气气溶胶粒子与 PSL 的粒径浓度分布, 可以看出大气气溶胶的粒径分布基本符合正态分布, 较为集中且连续, 粒径在  $0.03 \sim 0.30 \mu\text{m}$  内的粒子占大多数。由于样品室存在大气气溶胶, 所以图 3(a) 显示的 PSL 粒径图中  $0.03 \sim 0.30 \mu\text{m}$  的粒子较多, PSL 的粒径浓度曲线与大气气溶胶的粒径浓度曲线前半段基本吻合, 区别是 PSL 粒径浓度曲线在  $1.89 \mu\text{m}$  处出现一处尖峰, 推测是由 PSL 发生米散射引起。图 3(b) 为大气气溶胶粒子与 PSL 的质量浓度分布, 可以看出

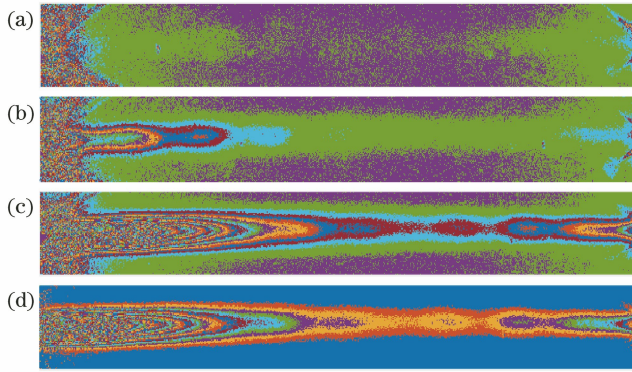


图2 极化浊度计 PSL 粒子观测图像。(a)背景图像;(b)低浓度 PSL 散射光图像;(c)高浓度 PSL 散射光图像;(d)降噪后 PSL 散射光图像

Fig. 2 Image of PSL particles from polarization nephelometer. (a) Image of the background; (b) image of low-level PSL scattered light; (c) image of high-level PSL scattered light; (d) image of PSL scattered light after noise reduction

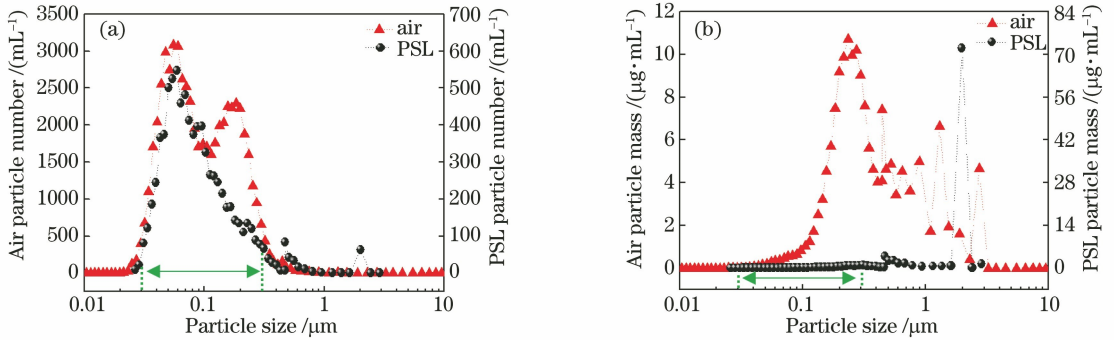


图3 WPS 观测结果。(a)颗粒粒径浓度;(b)颗粒质量浓度

Fig. 3 Observations results of WPS. (a) Particle size concentration of particulate matter; (b) mass concentration of particulate matter

大气气溶胶粒子的质量浓度分布较为均匀,主要集中在  $0.20 \mu\text{m}$  处,最大为  $11.00 \mu\text{g}/\text{mL}$ ,而 PSL 粒子,在  $1.89 \mu\text{m}$  处有一明显尖峰,数值为  $72.00 \mu\text{g}/\text{mL}$ ,明显高于背景值;一般情况下大气密度为  $1.293 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,而 PSL 粒子密度大约为  $1050 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,远大于大气密度,导致 PSL 数量虽然不多,但质量浓度远大于大气气溶胶粒子的质量浓度,这从侧面验证了 PSL 已进入设备样品室。WPS 对  $2 \mu\text{m}$  的 PSL 标准粒子的检测结果为  $1.89 \mu\text{m}$ ,与实际粒径偏差为  $5.5\%$ ,原因是

WPS 本身存在一定的鞘气流量偏差,电压偏差以及仪器粒径分辨率有限<sup>[13]</sup>,同时考虑到 PSL 自身有  $\pm 0.02 \mu\text{m}$  的误差,可以认为 WPS 测量的颗粒与真实粒径存在的偏差在可接受范围内。

### 3.3 SEM 数据

SEM 可得到清晰的颗粒图像,并对颗粒粒径进行粗略评估,为了获得样品的真实粒径分布,通过 SEM 对 PSL 进行图像采集,以获取其真实的粒径分布,结果如图 4 所示。可以看出,PSL 呈规则球

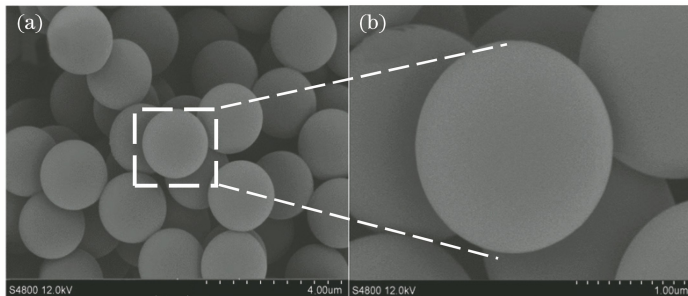


图4 PSL 标准粒子样品 SEM 图像。(a)原始图像;(b) SEM 的放大图

Fig. 4 SEM images of PSL standard particle samples. (a) Original image; (b) enlarged image of SEM

形,表面光滑无褶皱,且颗粒粒径大体相似,趋近于单分散颗粒系。通过 Nano Measure 软件对 PSL 图像进行处理,统计分析得到的粒子粒径如图 5 所示,其中横坐标为颗粒粒径,纵坐标分别为颗粒粒径分布的累积频率与相对频率,可以看出 PSL 粒子的粒径大多集中在  $1.96 \sim 2.32 \mu\text{m}$ ,最小粒径为  $1.96 \mu\text{m}$ ,最大粒径为  $2.32 \mu\text{m}$ ,平均粒径为  $2.06 \mu\text{m}$ ,与 PSL 真实粒径接近,检测粒径略大于真实粒径,粒径偏差为 3.15%。但扫描电镜检测过程繁琐,受主观因素影响较大,且价格昂贵,一定程度上限制了其在颗粒粒径检测领域的应用。

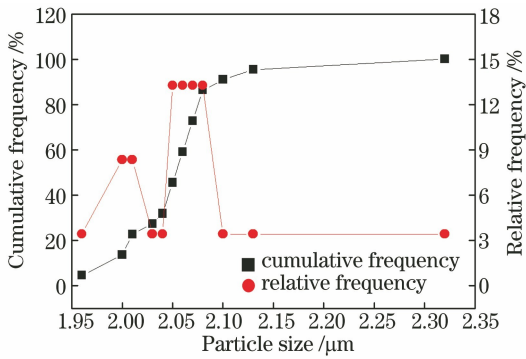


图 5 SEM 对 PSL 粒径信息统计

Fig. 5 Statistics of PSL particle size by SEM

### 3.4 极化浊度计检测结果

为方便比较,将测得的散射光光强与理论散射光光强进行归一化处理,图 6(a)为偏振角为  $0^\circ$  时  $2 \mu\text{m}$  的 PSL 理论散射相函数与极化浊度计实际测量的散射相函数。可以看出大气气溶胶散射相函数相对较为平滑,散射强度较小,总体呈散射光强度随角度增大而减小的趋势。PSL 的散射相函数出现明显的波动现象,与文献[14]的结果基本一致。主要原因是颗粒粒径远小于入射光波长,散射光强在各个方向上分布相对比较均匀,不会产生起伏;随着

粒子粒径的增大,散射相函数在各个角度的分布越来越复杂,振荡也越来越剧烈<sup>[15-16]</sup>,原因是实验中 PSL 粒径明显大于波长<sup>[17]</sup>;此外,根据 3.1 小节 WPS 的数据,大气气溶胶含有  $0.02 \sim 0.30 \mu\text{m}$  粒径不等的颗粒,这会对 PSL 的观测造成干扰,CCD 接收到的数据为所有颗粒的散射光强叠增加值,导致散射相函数趋于平滑。如图 6(a)所示,PSL 粒子散射能量的分布更多集中在  $10^\circ \sim 90^\circ$  前向小角度范围内;在  $90^\circ \sim 170^\circ$  的后向角度中,散射光强较小,振荡幅度也较小。与理论 PSL 散射相函数相比,极化浊度计测得的 PSL 散射相函数也存在振荡现象,且总体趋势与理论值相似,基本为散射光强度随角度增大逐渐减小的趋势,各个波峰位置有所偏差但基本保持一致。在  $10^\circ \sim 90^\circ$  内,散射光强度逐渐减弱;在  $90^\circ \sim 170^\circ$  范围内,主要为后向散射,散射光强度波动较大。图 6(b)为偏振角为  $90^\circ$  时的 PSL 散射相函数,极化浊度计数据与理论值基本保持一致,可以看出,散射光强度随角度的增大先减小后增大,当波长为  $532 \text{ nm}$  的激光经过 PSL 粒子群后,散射光主要集中在前向小角度,且随着散射角的增大散射强度迅速减小,在  $90^\circ \sim 130^\circ$  后向范围内粒子的散射强度非常小,在  $130^\circ \sim 170^\circ$  内,散射光强度有所增加,后向散射逐渐增强。为了直观比较极化浊度计得到的 PSL 粒径与理论值的差异,通过 Origin 软件对检测值与理论值进行了相关性分析,图 7(a)和图 7(b)分别是偏振角为  $0^\circ$  和  $90^\circ$  时的对比结果,通过插值法将实测数据与理论数据的个数保持一致,将  $15^\circ \sim 175^\circ$  区间内各个角度对应的实测散射光强度与理论散射光强度进行对比,其横轴为  $2 \mu\text{m}$  的 PSL 理论散射光强,纵轴为极化浊度计的检测值,可以看出本装置的实测值与理论值,有良好的相关性。偏振角为  $0^\circ$  时检测值与理论值的相关系数为

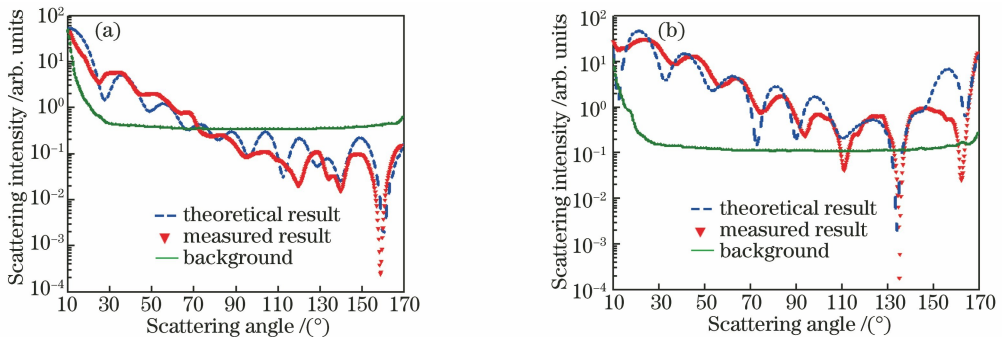


图 6 PSL 的实测和理论散射相函数对比。(a)偏振角为  $0^\circ$ ; (b)偏振角为  $90^\circ$

Fig. 6 Comparison of measured and theoretical scattering phase functions for PSL.

(a) Polarization angle is  $0^\circ$ ; (b) polarization angle is  $90^\circ$

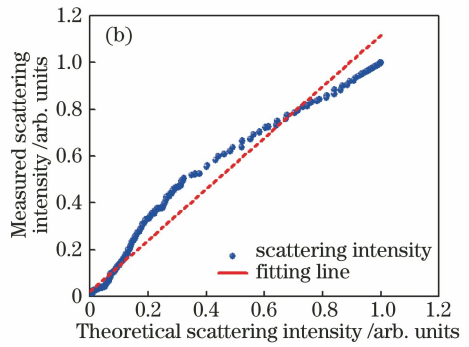
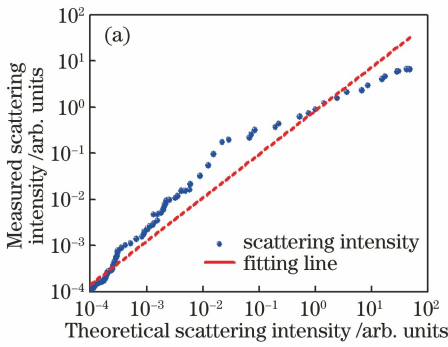


图 7 PSL 标准粒子散射相函数理论值与测量值对比结果。(a)偏振角为 0°;(b)偏振角为 90°

Fig. 7 Comparison of theoretical and measured values of PSL particle scattering phase function.

(a) Polarization angle is 0°; (b) polarization angle is 90°

0.9351,均方根误差为 0.8729;偏振角为 90°时检测值与理论值的相关系数为 0.9403,均方根误差为 0.8842。由于样品室区域过大且样品浓度高,可能会产生一定的相干散射与复散射,对观测结果造成一定的干扰<sup>[18]</sup>,导致检测值与理论值有一点差异。

提取所有 PSL 散射光图像的灰度值,处理后得到对应散射相函数,使用 Chahine 迭代算法反演得到对应的 PSL 粒径,结果如图 8 所示。可以发现,极化浊度计对标称粒径为 2 μm 的 PSL 的检测结果为 1.94 μm,相对标准偏差为 3%。同时,D10(一个样品的累计粒径分布数达到 10%时对应的粒径)与 D90 为 1.93 μm 与 2.02 μm,相对偏差均值小于 5%,D50 为 1.94 μm,相对偏差小于 3%,符合相应国家标准<sup>[19]</sup>。三种仪器对 PSL 粒径的检测结果如表 1 所示,可以看出成像极化浊度计对 PSL 粒子的检测粒径与标称粒径最接近,准确性最高。此外,本装置在米散射理论上对颗粒粒径进行检测,通过 Matlab 得到米散射理论散射相函数,将其与检测值进行对比,而米散射理论适用范围与激光波长 λ 密切相关,通常采用无量纲尺度数  $\alpha = 2\pi r/\lambda$  作为判断标准,其中 r 为粒子半径,当  $0.1 < \alpha < 50$  时,符合米散射定义。实验使用激光波长为 532 nm,可推

测出极化浊度计的观测范围为 0.017~8.400 μm,这表明本装置在颗粒粒径检测领域的应用潜力较大。

表 1 PSL 粒子检测结果

Table 1 PSL particle detection results

Method	WPS	SEM	IPN
Particle diameter / μm	1.890	2.063	1.940
Deviation / %	5.50	3.15	3.00

## 4 结 论

根据米散射理论,设计了基于 CCD 的极化浊度计,利用该装置对 2 μm 的 PSL 粒径进行检测,得到大角度的 PSL 散射图像。通过去背景法与叠加平均法消除背景噪音,得到其散射相函数;将检测结果与 2 μm 球形颗粒的理论散射相函数进行对比拟合,得到较好的线性相关性,通过 Chahine 迭代算法反演得到的粒径为 1.94 μm。将检测结果与主流颗粒粒径检测装置进行对比,结果表明,该装置检测结果准确,不受主观因素影响,分辨率高同时还兼顾检测实时性,在颗粒粒径检测方面有较好的应用前景,可与传统方法相互补充,为颗粒粒径检测提供新思路。

**致谢** 感谢中国科学院安徽光学精密机械研究所的李学彬老师提供宽范围粒径谱仪,为本文提供了粒径数据对比。

## 参 考 文 献

[1] Shen J Q, Riebel U, Guo X A. Measurements of particle-size distribution and concentration by transmission fluctuation spectrometry with temporal correlation[J]. Optics Letters, 2005, 30(16): 2098-2100.

[2] Lee Black D, McQuay M Q, Bonin M P. Laser-based techniques for particle-size measurement: a review of

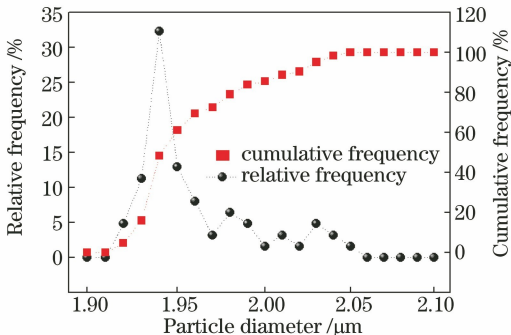


图 8 PSL 粒径分布反演结果

Fig. 8 Inversion results of PSL particle size distribution

- sizing methods and their industrial applications [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1996, 22(3): 267-306.
- [3] Szymanski W W, Nagy A, Czitrovszky A, et al. A new method for the simultaneous measurement of aerosol particle size, complex refractive index and particle density [J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13(3): 303-307.
- [4] Canakci A, Erdemir F, Varol T, et al. Determining the effect of process parameters on particle size in mechanical milling using the Taguchi method: measurement and analysis [J]. *Measurement*, 2013, 46(9): 3532-3540.
- [5] Hu M, Xie J L, Wu D F, et al. Measurement of PM<sub>2.5</sub> concentration based on the charge-coupled device backward scattering lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0201002.  
胡森, 谢家亮, 吴端法, 等. 基于 CCD 后向散射激光信号的 PM<sub>2.5</sub> 测量研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0201002.
- [6] Chen Q, Liu W, Wang W J, et al. Particle sizing by the Fraunhofer diffraction method based on an approximate non-negatively constrained Chin-Shifrin algorithm [J]. *Powder Technology*, 2017, 317: 95-103.
- [7] Song M, Liu P F, Hanna S J, et al. Relative humidity-dependent viscosity of secondary organic material from toluene photo-oxidation and possible implications for organic particulate matter over megacities [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(14): 8817-8830.
- [8] Mei L, Guan P, Yang, et al. Atmospheric extinction coefficient retrieval and validation for the single-band Mie-scattering Scheimpflug lidar technique [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): A628-A638.
- [9] Mei L, Kong Z, Ma T. Dual-wavelength Mie-scattering Scheimpflug lidar system developed for the studies of the aerosol extinction coefficient and the angstrom exponent [J]. *Optics Express*, 2018, 26(24): 31942-31956.
- [10] Meng X Q, Pan X, Liu X T, et al. Design and experimental verification of polar nephelometer based on imaging [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0510009.  
孟祥谦, 潘新, 刘兴涛, 等. 基于成像的极化浊度计设计与实验验证 [J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0510009.
- [11] Sudiarta I W, Chylek P. Mie-scattering formalism for spherical particles embedded in an absorbing medium [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2001, 18(6): 1275-1278.
- [12] Barnes J E, Parikh Sharma N C, Kaplan T B. Atmospheric aerosol profiling with a bistatic imaging lidar system [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(15): 2922-2929.
- [13] Liu X Y, Fang J Y, Li L, et al. Aerosol detection method based on wide-range particle spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(5): 0501002.  
刘宪云, 方佳怡, 李磊, 等. 基于宽范围粒径谱仪的气溶胶探测方法 [J]. *光子学报*, 2016, 45(5): 0501002.
- [14] Nakagawa M, Nakayama T, Sasago H, et al. Design and characterization of a novel single-particle polar nephelometer [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2016, 50(4): 392-404.
- [15] Meng X Q, Hu S X, Wang Z Z, et al. Vertical distribution of aerosol extinction coefficient detection in boundary layer using CCD lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0801003.  
孟祥谦, 胡顺星, 王珍珠, 等. CCD 激光雷达探测边界层气溶胶消光系数垂直分布 [J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0801003.
- [16] Zheng F T, Hua D X, Zhou A. Empirical mode decomposition algorithm research & application of Mie lidar atmospheric backscattering signal [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(5): 1068-1074.  
郑发泰, 华灯鑫, 周阿维. Mie 散射激光雷达大气回波信号经验模式分解算法的研究与应用 [J]. *中国激光*, 2009, 36(5): 1068-1074.
- [17] Sullenberger R M, Redmond S M, Crompton D, et al. Spatially-resolved individual particle spectroscopy using photothermal modulation of Mie scattering [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(2): 203-206.
- [18] Vo Q S, Feng P, Tang B, et al. Study on properties of light scattering based on Mie scattering theory for suspended particles in water [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 013001.  
Vo Quang Sang, 冯鹏, 汤斌, 等. 基于米氏散射理论的水中悬浮颗粒物散射特性计算 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(1): 013001.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 粒度分析-激光衍射法-第 1 部分: 通则 GB/T19077.1-2008, [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.