

# 基于光散射的实时气溶胶粒子形状识别技术研究

卜一川<sup>1,2</sup> 赵永凯<sup>2,3</sup> 陈正岩<sup>2,3</sup> 张佩<sup>2</sup> 黄惠杰<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院大学, 北京 100049

<sup>2</sup>中国科学院上海光学与精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800

<sup>3</sup>上海市大恒光学精密机械有限公司, 上海 201800

**摘要** 利用米氏散射理论和时域有限差分(FDTD)软件计算了不同大小、形状和折射率粒子的前向散射光场分布,分析了通过光强度分布和非对称因子反演粒子相关信息、区分粒形的可行性。研制了一台利用增强型CCD相机在线采集单个气溶胶粒子在5°~19°前向散射角范围内光场图样的装置。8 μm粒径的聚苯乙烯球形粒子散射图样实验结果与理论计算对比为吻合,验证了该装置的有效性。应用该装置对不同形状的气溶胶粒子进行检测,结果表明能够从散射图像和反演计算结果区分出球形、杆状和其他形状粒子。

**关键词** 激光技术; 形状识别; 光散射; 气溶胶

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0413003

## Research on Real-Time Aerosol Particle Shape Identification Based on Scattered Light Detection

Bu Yichuan<sup>1,2</sup> Zhao Yongkai<sup>2,3</sup> Chen Zhengyan<sup>2,3</sup> Zhang Pei<sup>2</sup> Huang Huijie<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

<sup>2</sup>Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China

<sup>3</sup>Shanghai Daheng Optics and Fine Mechanics Co., Ltd, Shanghai 201800, China

**Abstract** The scattered light distributions of particles with different parameters of size, shape and refractive index are simulated with Mie theory and finite difference time domain (FDTD) software. The feasibility of particle shape inversed method with scattering intensity distribution and asymmetrical factor is discussed. Based on this result, a real-time aerosol particle shape identification device (RAPSID) is developed. It can collect the forward scattered light pattern with scattering angle from 5 to 19 degree by an ICCD camera. The pattern of an 8 μm polystyrene sphere particle is approximately consistent with the result of Mie scattering calculation, which verifies the accuracy of RAPSID. The test results of RAPSID for aerosol particles with different sizes show that particles of spherical, rhabdoid and other shapes can be distinguished from scattering image and inversed calculation results.

**Key words** laser technique; shape identification; light scattering; aerosol

**OCIS codes** 010.1100; 290.2558; 290.5850; 100.3005

## 1 引言

气溶胶粒子是指能够长时间悬浮在空气中并能够被观察或测量的液体或固体粒子,其粒径大多在0.001~100 μm之间<sup>[1]</sup>。空气动力学粒径小于10 μm的粒子称为可吸入颗粒物(PM10),小于2.5 μm的粒子称

收稿日期: 2014-11-14; 收到修改稿日期: 2014-12-01

基金项目: 上海市青年科技启明星计划(B类)(12QB1401000)

作者简介: 卜一川(1989—),男,硕士研究生,主要从光电检测技术方面的研究。E-mail: buyichuan@siom.ac.cn

导师简介: 赵永凯(1978—),男,副研究员,主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: zhaoyongkai@siom.ac.cn(通信联系人)

为细颗粒物(PM2.5)。

气溶胶粒子对地气辐射平衡、成云致雨、水循环、能见度改变等诸多物理化学过程以及人体健康有重要影响<sup>[2]</sup>。开展实时、原位的气溶胶粒子检测和分类技术是开展相关领域研究的客观需求<sup>[1]</sup>。

气溶胶粒子的主要表征参数有粒径、粒形、折射率、光谱信息、化学组成等。目前常用的气溶胶粒子检测技术有光散射法<sup>[3-4]</sup>、激光诱导荧光法<sup>[5-6]</sup>、质谱分析法<sup>[7-8]</sup>等。其中,光散射法具有快速、直接、灵敏、无损等特点,已成为气溶胶粒子实时检测的有效技术手段。光学粒子计数器已被广泛用于测量单个粒子散射光场强度分布以获取气溶胶粒子粒径的尺度分布<sup>[9-10]</sup>。在此基础上发展的粒子散射光场图样检测技术,为获取粒子的粒形以及表面形貌特征等物理性质提供了可行的手段。

不同种类气溶胶粒子一般具有不同粒形,较为简单的形状包括球体(水滴或油滴)或圆柱体(玻璃纤维)等。许多粒子具有较为复杂的形状,如石棉纤维、规则或不规则的晶体粒子等。生物气溶胶粒子的基本形态包括球形、杆状、螺旋状和弧形等种类<sup>[11]</sup>。在不同的工作或生活环境中,气溶胶粒子的粒径和形状可以为研究其种类和来源提供线索,并且对研究粒子特征有重要帮助,是其它粒子测量技术的有力辅助<sup>[12]</sup>。

英国赫特福德大学的 Kaye 和美国耶鲁大学的 Chang 从上世纪 90 年代起就开始了利用光散射法对气溶胶粒子进行检测研究。Kaye 等<sup>[13-14]</sup>成功研制出了应用于冰晶颗粒分辨以及石棉纤维检测的装置,Chang 等<sup>[15-16]</sup>通过捕获二维角向散射(TAOS)图像成功分辨了活体细胞。国内中国科学院安徽光学精密机械研究所的邵世勇等<sup>[17]</sup>利用基于成像法的气溶胶粒形和散射分析仪拍摄到了截面直径 10 μm 的棉絮纤维显微放大图像并检测到其散射光强度和偏振态的变化。中国科学院上海光学精密机械研究所的冯春霞等<sup>[18]</sup>利用 T 矩阵的方法研究了长椭球和球形粒子对散射相函数的影响。

本文通过米氏散射理论和时域有限差分(FDTD)软件计算了不同粒子的散射光场,讨论了通过散射光强度分布和非对称因子反演出粒子形状等参数信息的可行性。研制了一台基于前向散射光场的实时气溶胶粒子形状识别装置(RAPSID)。通过球形粒子实验与理论计算结果的对比分析验证了该装置的准确性。使用该装置对各种形状的气溶胶粒子进行了检测实验。结果表明不同形状粒子可由其散射图像和反演算法初步区分。

## 2 检测原理

单个粒子的散射光场包含了粒子尺寸、形状、折射率、粒子取向以及入射光波长和偏振态等信息。在入射光已知的条件下,通过研究粒子的散射光场能够获取粒子的相关信息。

入射光和粒子的相互作用如图 1 所示,包括弹性散射和非弹性散射。在粒子散射光场图像检测中涉及粒子的弹性散射,主要包括衍射、折射和反射<sup>[19]</sup>。

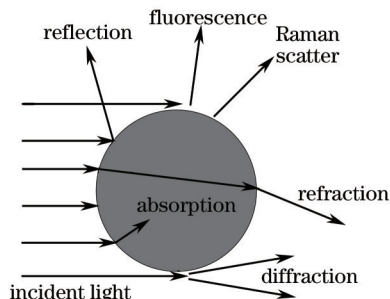


图 1 入射光同粒子的相互作用

Fig.1 Interactions between incident light and a particle

### 2.1 球形粒子的散射

根据电磁理论<sup>[20]</sup>,可以得到各项同性的均匀球形粒子散射光场角分布的严格数学解。在自然光入射条件下,粒子散射光的空间分布可用强度函数  $i$  来描述

$$i = i(\theta, \alpha, m) = i_{\perp} + i_{\parallel}, \quad (1)$$

式中  $\theta$  为散射角;  $m$  是粒子的折射率;  $\alpha = \pi D/\lambda$  为粒子直径和波长的无因次参量,其中  $D$  为粒子直径,  $\lambda$  是

入射光波的波长;  $i_{\perp}$  和  $i_{\parallel}$  为强度函数分别在垂直和平行于散射面方向的强度分量,

$$i_{\perp} = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n + b_n \pi_n) \right|^2, \quad (2)$$

$$i_{\parallel} = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n) \right|^2, \quad (3)$$

式中  $a_n$ 、 $b_n$  为米氏散射系数, 只与  $\alpha$ 、 $m$  有关;  $\pi_n$ 、 $\tau_n$  是与散射角  $\theta$  有关的函数。通过上述表达式以及  $a_n$ 、 $b_n$ 、 $\pi_n$ 、 $\tau_n$  的具体形式, 可以得到均匀球形粒子的散射光强度分布<sup>[21]</sup>。图 2(a) 是直径分别为 1、2、4 和 8  $\mu\text{m}$  的聚苯乙烯(PSL)球形粒子散射曲线, 其折射率为 1.59; 图 2(b) 是直径为 4  $\mu\text{m}$  的水珠、PSL 小球、ZnO、TiO<sub>2</sub> 的球形粒子散射曲线, 其折射率分别为 1.33、1.59、2 和 2.5。

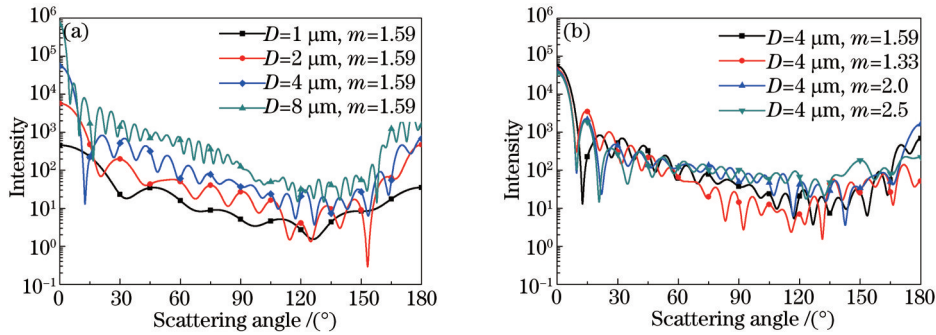


图 2 (a) 折射率为 1.59, 直径分别为 1、2、4 和 8  $\mu\text{m}$  的球形粒子散射曲线; (b) 直径为 4  $\mu\text{m}$ , 折射率分别为 1.33、1.59、2 和 2.5 的球形粒子散射曲线

Fig.2 (a) Scattering distribution curve of sphere particles with a diameter of 1, 2, 4 and 8  $\mu\text{m}$  ( $m=1.59$ ); (b) scattering distribution curve of sphere particles with an index of refraction of 1.33, 1.59, 2 and 2.5 ( $D=4 \mu\text{m}$ )

对于球形粒子, 其前向散射二维平面图像为图 2 中强度曲线沿中心轴旋转构成的同心亮、暗圆环结构。不同粒径和不同折射率粒子的散射图样中, 亮环、暗环的位置、个数以及强度不同, 因而为反演粒子粒径与折射率, 区分球形与非球形粒子提供了理论依据。

### 2.2 非球形粒子的散射

球形粒子散射可以基于米氏散射进行理论分析, 但是非球形粒子的散射光场求解十分复杂, 目前主要采用数值计算的方法。许多算法被应用到求解这类问题当中, 例如离散偶极子法(DDA), FDTD 方法和 T 矩阵法等<sup>[22]</sup>。其中, FDTD 方法较早应用于仿真电磁波的传播及与物质的相互作用, 可适用于计算不规则粒子的散射。

图 3 是使用 EastFDTD 软件建立的椭球形、杆状、螺旋状、立方体等形状粒子的模型和 0°~30° 前向散射角

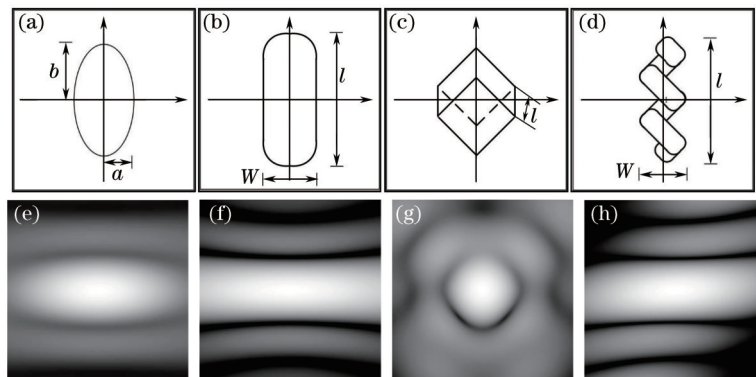


图 3 (a)~(d) 粒子模型; (e)~(h) 粒子散射图像。(a)和(e)椭球形粒子( $a=0.5 \mu\text{m}$ ,  $b=1.5 \mu\text{m}$ )、(b)和(f)杆状粒子( $w=0.5 \mu\text{m}$ ,  $l=3 \mu\text{m}$ )、(c)和(g)立方体形( $l=2 \mu\text{m}$ ); (d)和(h)螺旋状粒子( $w=1.0 \mu\text{m}$ ,  $l=3.0 \mu\text{m}$ )

Fig.3 (a)~(d) Simulation models; (e)~(h) results with EastFDTD. (a) and (e) ellipsoid ( $a=0.5 \mu\text{m}$ ,  $b=1.5 \mu\text{m}$ ); (b) and (f) rhabdoid ( $w=0.5 \mu\text{m}$ ,  $l=3 \mu\text{m}$ ), (c) and (g) cube ( $l=2 \mu\text{m}$ ); (d) and (h) spiral ( $w=1.0 \mu\text{m}$ ,  $l=3.0 \mu\text{m}$ )

内光场仿真的二维图样,图像灰度进行了对数变换。仿真设置的光源为 635 nm 的线偏振光,采用卷积完全匹配层(CPML)作为吸收边界条件,网格条件为共形非均匀。利用 FDTD 软件计算球形粒子近前向散射区域内的光场分布,并与米氏散射结果对比,选取了误差相对较小的精度控制设置。从仿真结果看出,不同形状的粒子的散射图像区别较大。椭球形粒子的散射图像同球形粒子的散射图样类似,不过呈同心的椭球形结构。杆状粒子的散射图像同其衍射图像相似,为条纹状,中心强度高,两端强度低。复杂形状粒子的散射图像则各有特点,可以通过图像处理和识别技术<sup>[23-24]</sup>进行进一步判别。

### 2.3 粒形的判别

分析非球形粒子形状信息通常可以使用非对称因子( $A_t$ )<sup>[25]</sup>。 $A_t$ 值表示特定散射角下,沿不同方位角的光强分布,其数学表达式为:

$$A_t = k \left[ \sum_{i=1}^n (\bar{I} - I_i)^2 \right]^{1/2} / \bar{I} \quad (4)$$

式中,

$$k = \frac{100}{\sqrt{n(n-1)}} \quad (5)$$

式中  $n$  为该散射角下不同方位角所对应散射光强值的个数;  $I_i$  为与该  $n$  值对应的散射光强大小;  $\bar{I}$  为所有  $I_i$  的平均值;  $k$  为常数,使  $A_t$  最大值为 100。对于理想球形粒子,由于对称性,  $A_t$  值为 0; 对于非球形粒子,  $A_t$  值介于 0 和 100 之间。通过研究表 1 中所示不同粒径、粒形及折射率的粒子的散射光场分布,使用光强和非对称因子反演粒子粒形。表 1 中的  $D_s$  表示等表面积的理想球形粒子直径。

表 1 粒子仿真参数

Table 1 Parameters of simulation particles

Particle shape	Particle size / $\mu\text{m}$	$D_s$ / $\mu\text{m}$	Index of refraction
Sphere	$d=2$	2	1.59
Sphere	$d=2$	2	$1.95+0.66i$
Sphere	$d=2$	2	1.33
Sphere	$d=3$	3	1.59
Sphere	$d=4$	4	1.59
Ellipsoid	$a=0.78, b=1.5$	2	1.59
Ellipsoid	$a=0.61, b=2$	2	1.59
Ellipsoid	$a=0.5, b=2.5$	2	1.59
Rhabdoid	$l=4, w=0.8$	2	1.59
Cube	$l=1.4472$	2	1.59
Spiral	$l=4.5, w=1.9$	/	1.59

图 4 所示是表 1 中部分粒子的非对称因子  $A_t$  值与散射角之间的关系图。图 4 中不同形状粒子在  $5^\circ \sim 20^\circ$

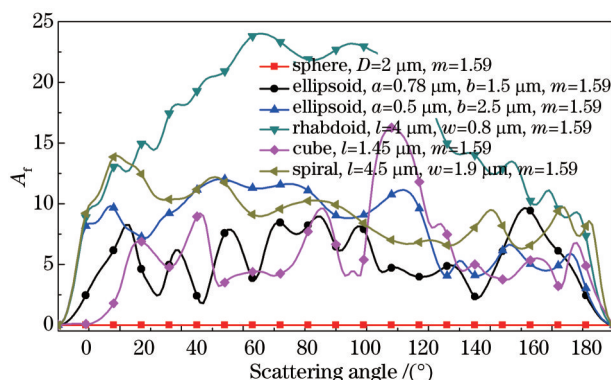


图 4 单个粒子的非对称因子  $A_t$  与散射角之间的关系图

Fig.4  $A_t$  versus scattering angle for individual particles

前向散射角区域内非对称因子 $A_r$ 均值如下:球形粒子为0,  $a/b$ 为0.5的椭球形粒子为4,  $a/b$ 为0.2的椭球形粒子为8, 立方体形粒子为0.77, 杆状和螺旋状粒子分别为9.66和10.28。由上述结果可知,不同形状的粒子 $A_r$ 均值有较明显的差别,因此通过分析前向散射角内的 $A_r$ 值能够获得粒子的形状信息。

图5所示是不同粒子在 $5^\circ\sim 20^\circ$ 散射角内的强度积分同方位角之间的关系。从图5中可知,对于折射率相同的球形粒子在不同方位角上的散射光强度基本相同,粒径越大的粒子,其相应的散射光强越大;对于折射率不同但粒径相同的球形粒子,其散射的光强度各不相同;对于非球形粒子,散射光强在方位角为 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 和 $270^\circ$ 时取得极值,并且随着粒子非对称因子的增大,散射光强的波动也越明显。这些特点可以用于粒子形状、折射率等的反演。

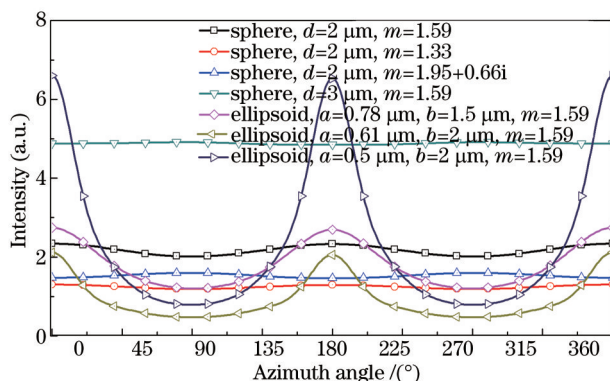


图5 单个粒子在 $5^\circ\sim 20^\circ$ 散射角内的积分强度与方位角之间的关系

Fig.5 Integrated scattering intensity within  $5^\circ\sim 20^\circ$  scattering angle versus azimuth angle for individual particles

不同粒形、粒径、折射率的粒子所产生的散射光强度以及非对称因子 $A_r$ 值都是不一样的,图6为几种不同粒子在 $5^\circ\sim 20^\circ$ 内的散射强度积分与平均 $A_r$ 值之间的关系图。等效粒径越大的粒子其积分的散射光强度也越大,通过光强度的大小可以区分出不同粒径的粒子。对于等效粒径相同的粒子,由于折射率、粒形的不同,散射光强也有着区别,对于同是等效粒径为 $2\ \mu\text{m}$ 的PSL小球或椭球体、细菌、碳粉,它们的散射光强也各不一样。对于等效粒径同为 $2\ \mu\text{m}$ 的球形( $A_r=0$ ),椭球形( $A_r=4\sim 8$ )和立方体( $A_r=0.77\sim 0.9$ ),它们的非对称因子 $A_r$ 值各不相同,且随着非球形度的增大,非对称因子 $A_r$ 值也在增大。对于模拟的杆状和螺旋状粒子,两者的 $A_r$ 值相差并不大,但是结合两者强度值的对比,能够很容易地辨别出两者的区别。因此,通过非对称因子 $A_r$ 值以及散射光的强度可以区分出不同形状的粒子。

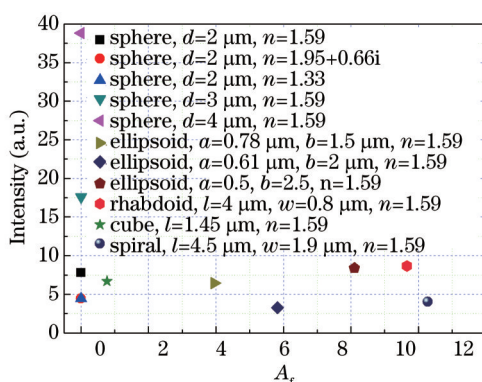


图6 不同粒子在 $5^\circ\sim 20^\circ$ 散射角内积分强度与 $A_r$ 之间的关系

Fig.6 Integrated scattering intensity within  $5^\circ\sim 20^\circ$  scattering angle versus  $A_r$  for different particles

### 3 检测实验装置设计

图7所示为RAPSID的结构示意图。1:光纤激光器;2:柱面聚焦透镜;3:散射区域;4:双胶合透镜;5:聚焦镜;6:光电探测器;7:光陷阱;8:平板玻璃;9:接收镜组;10:光阑;11:ICCD相机;12:气溶胶进气喷嘴;13:气溶胶出气喷嘴。气溶胶粒子通过进气喷嘴进入装置,气流运动方向沿 $z$ 轴。RAPSID使用的照明光源为波长为 $635\ \text{nm}$

的连续工作单模光纤半导体激光器(熙隆光电,FC-635-080-SM),功率为63.9 mW,沿y轴方向出射。照明光束经过准直后被柱面镜( $f=60$  mm)在z方向上一维聚焦,在气路中心形成矩形焦线。光路和气路交汇区域是粒子和入射光作用的散射区域。入射光与进入该散射区域的单个粒子相互作用,产生空间散射光场。

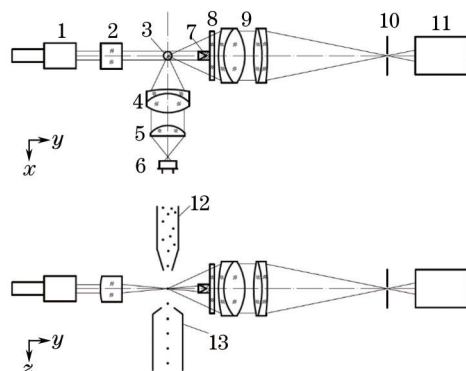


图7 实时气溶胶粒子形状识别装置示意图

Fig.7 Schematic diagram of real-time aerosol particle shape identification device (RAPSID)

在装置中,使用双胶合透镜( $f=31.9$  mm)与聚焦镜接收侧向散射光,通过光电转换器件将光信号转化成电信号,从而获取粒子的光学等效粒径相关信息。前向散射光使用THORLABS公司MAP1040100-B透镜组( $f_1=40$  mm,  $f_2=100$  mm)进行接收,透镜组前焦点设计位于散射区域中心处。

粒子的散射光强度同入射光源相比弱很多,因此在装置前向接收光路中设计有光陷阱以消除入射光。本装置在透镜组前端使用 $\Phi 4$  mm的光陷阱吸收入射光,这同时会遮挡住散射角 $5^\circ$ 以内的前向散射光,导致采集图像中心有一个圆形暗斑。

由于透镜参数等实验条件限制,装置前向最大接收角度为 $19^\circ$ 。接收镜组将 $5^\circ\sim 19^\circ$ 范围内的前向散射光聚焦,在镜组后焦点位置处放入直径为2 mm的光阑,使得散射光通过并滤除杂散光。在光阑的后方放置有增强型CCD相机接收散射光场图样。

本装置样气流量为1 L/min,粒子的运动速度约为5 m/s,相机的曝光时间设置为100 ns。由于曝光的时间很短,粒子相对位移约为 $0.5\ \mu\text{m}$ ,得到的图像质量较好,拖影等现象不明显。

目前,RAPSID能够采集到散射角在 $5^\circ\sim 19^\circ$ ,方位角 $0^\circ\sim 360^\circ$ 之内的单个粒子的散射图像,基本达到了设计目标,速度每秒最快能够采集25 frame。

## 4 实验结果

### 4.1 粒子前向散射光场图像

利用已有设备组建了性能测试系统<sup>[26]</sup>,采用本装置对粒径 $7.979\ \mu\text{m}$ 的PSL小球气溶胶进行检测,验证装置有效性,结果如图8所示。图8(a)是RAPSID采集到的聚苯乙烯小球的散射图像,图8(b)是采集到的图像光

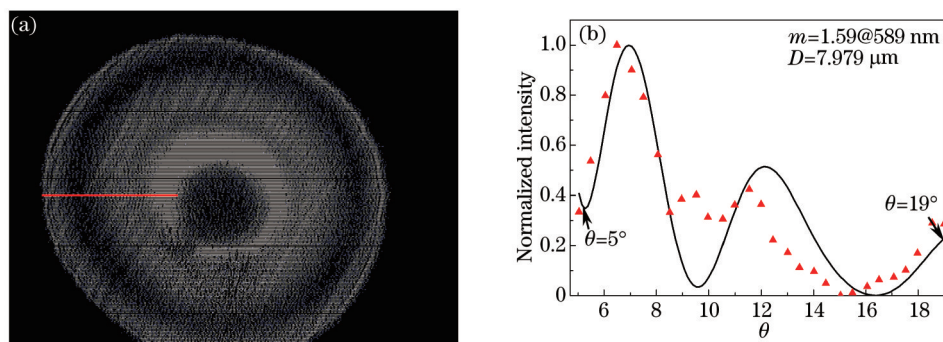


图8 (a) 实时气溶胶粒子形状识别装置采集到的单个聚苯乙烯小球( $D=7.979\ \mu\text{m}$ )的散射图像;(b) 实验和理论的对照曲线

Fig.8 (a) Measured scattering-pattern of polystyrene sphere particle with a diameter of  $7.979\ \mu\text{m}$ ; (b) comparison between scattering pattern measurement and calculation

强分布同理论计算值的对比。图中黑色曲线是通过米氏散射计算得到聚苯乙烯小球的散射光强度归一化曲线,红色的三角点是散射图像红线位置测量的归一化强度值。

从图8(b)中可以看出,实际曲线与理论曲线极大位置等较为吻合,但仍存在着一些差异。导致这些不一致可能原因有:1)由于装置还未能较好的消除杂散光,影响了最终采集的散射图像;2)目前装置中缺少定位触发系统,导致曝光时粒子并不一定处于散射区域和接收光路的中心位置,引入了误差;3)实际接收光路的像差也会对散射图像带来影响;4)PSL小球从雾化器中发生出来后没有被完全干燥,在表面吸附着一层水膜,改变了实际小球的复折射率和粒径,影响了粒子散射光场。

#### 4.2 不同形状粒子的实验结果

利用RAPSID对不同气溶胶粒子进行采集,得到了如图9所示的不同形状气溶胶粒子的前向散射图像。

图9(a)是对使用雾化器产生的不同粒径水珠检测得到的同心圆环状散射图像;图9(b)左起第1幅是对剪碎的杆状或锥杆状毛刷检测得到的条状散射图像,中右两幅是对大气采样得到的图像;图9(c)左起第1、2幅分别是对使用扬尘的方法产生的食盐和蛋白质粉粒子采集的图像,第3幅对应空气中的灰尘。

由图9可知,球形或杆状的粒子的散射图样从图形上能够直观地分辨出来,但是对于复杂形状的粒子,如图9(c)粒子的散射图像的分辨较为困难。

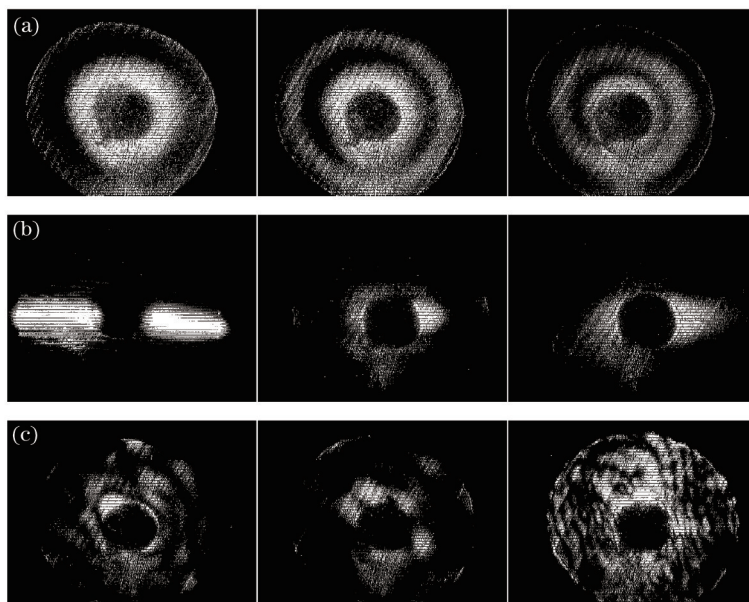


图9 实时气溶胶粒子形状识别装置采集到的散射图像。(a)球形粒子的散射图像;(b)杆状粒子的散射图像;  
(c)复杂形状粒子的散射图像

Fig.9 Scattering patterns of aerosol particles measured by RAPSID. (a) Sphere particles; (b) rhabdoid particles; (c) irregular particles

利用文中所述的方法对图9中第3排粒子进行区分。采用Matlab程序对所采集到的图像进行散射光强度和非对称因子 $A_1$ 的分析。首先寻找到散射图像的圆心位置,并提取出圆形边界。由于拍摄到粒子的中心与光陷阱、接收镜组的中心并不重合,造成 $5^\circ\sim 7^\circ$ 、 $17^\circ\sim 19^\circ$ 的散射角度范围内部分方位角位置的信息丢失。因此取散射角的区间大小为 $7^\circ\sim 17^\circ$ 。而后对得到的圆环图像进一步处理:将方位角划分成16等分,每一部分对应 $22.5^\circ$ 方位角范围内的信息;应用(4)式得到其非对称因子 $A_1$ 值分别为6.8、11.2、8.7,强度分别为18.5、17.7、31.3相应的强度和 $A_1$ 值对应关系图如图10所示。

从图10(b)中可以发现,通过光强和非对称因子 $A_1$ 值的对应关系图能够较好的区分出三种粒子。如果对大量气溶胶粒子进行检测,需要标定实验,建立完善的数据库,利用RAPSID采集到图像后,同数据库进行匹配,从而找到该粒子对应的形状,进而判断其种类<sup>[27]</sup>。

## 5 结 论

利用米氏散射理论和FDTD方法对不同大小、形状、折射率的粒子散射光场进行了仿真,依据结果分析

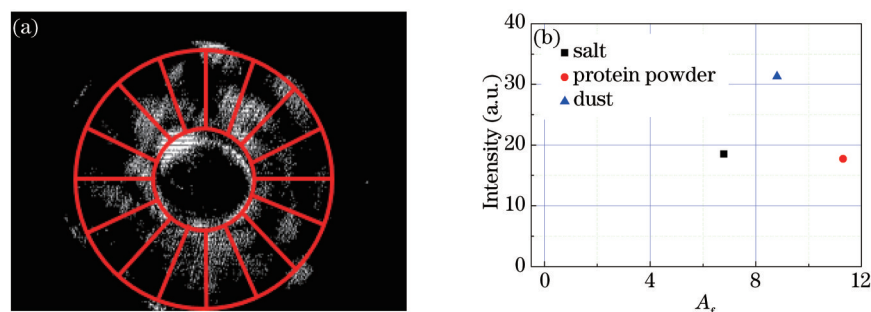


图 10 (a) 图形区域划分示意图; (b) 3 种不同粒子的强度与  $A_r$  值之间的关系图

Fig.10 (a) Schematic diagram of divided pattern; (b) scattering intensity versus  $A_r$  within  $7^\circ \sim 17^\circ$  scattering angle for different particles 了前向散射光强度分布和非对称因子  $A_r$  值能够反演出粒子形状的可行性。

研制了一台实时气溶胶粒子形状识别装置,开展对单个气溶胶粒子的形状检测研究。通过  $8 \mu\text{m}$  PSL 小球的前向散射图像与理论结果相验证,证明了装置的有效性。

应用研制的装置采集了不同形状气溶胶粒子的散射图像,分析判断出了球形、杆状和其他形状粒子。反演计算结果证明,该装置能够初步区分出较复杂粒形的气溶胶粒子。依据仿真与实验结果,探讨了检测装置和理论设计与分析中遇到的问题,为今后的改进做了良好的铺垫。

致谢 对刘鹭硕士在 FDTD 仿真方面以及张方博士和王健硕士在图像处理方面给予的大力支持和帮助表示感谢。

### 参考文献

- Paul A Baron, Klaus Willeke. *Aerosol Measurement Principles, Techniques, and Applications*, (Second Edition) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.  
保罗巴伦, 克劳斯维勒克. 气溶胶测量原理、技术及应用(第二版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- Zhang Lu. *Observation Study of Humidity Effects on Aerosol Light Scattering at a Regional Background Site in the Yangtze Delta Region*[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2014.  
张 璐. 长三角背景区域大气气溶胶吸湿增长特性观测研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2014.
- E Hirst, P H Kaye. Experimental and theoretical light scattering profiles from spherical and non-spherical particles[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1996, 101(D14): 19231-19235.
- K B Aptowicz, R G Pinnick, S C Hill, *et al.*. Optical scattering patterns from single urban aerosol particles at Adelphi, Maryland, USA: A classification relating to particle morphologies[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2006, 111(d12): d12212.
- Y L Pan, S C Hill, R G Pinnick, *et al.*. Dual excitation wavelength fluorescence spectra and elastic scattering for differentiation of single airborne pollen and fungal particles[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(8): 1555-1563.
- D Kiselev, L Bonacina, J P Wolf. Individual bioaerosol particle discrimination by multi-photon excited fluorescence[J]. *Optics Express*, 2011, 19(24): 24516-24521.
- E Gard, J E Mayer, B D Morrical, *et al.*. Real-time analysis of individual atmospheric aerosol particles: design and performance of a portable ATOFMS[J]. *Analytical Chemistry*, 1997, 69(20): 4083-4091.
- M Narukawa, Y Matsumi, J Matsumoto, *et al.*. Real-time analysis of secondary organic aerosol particles formed from cyclohexene ozonolysis using a laser-ionization single-particle aerosol mass spectrometer[J]. *Analytical Science*, 2007, 23(5): 507-512.
- Huang Huijie, Zhao Yongkai, Ren bingqiang, *et al.*. Aerosol particle measurement by laser diode light scattering[J]. *Chinese J Lasers*, 2002, 29(12): 1117-1121.  
黄惠杰, 赵永凯, 任冰强, 等. 尘埃粒子的半导体激光散射测量[J]. 中国激光, 2002, 29(12): 1117-1121.
- Sun Han, Grazia Lamanna, Bernhard Weigand. Measurement technique and verification of accuracy for particle sizing by low angle elastic light scattering[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0308004.  
孙 晗, Grazia Lamanna, Bernhard Weigand. 小角弹性光散射粒径测量技术与准确性验证[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308004.
- Li Fan, Xu Zhikai. *Medical Microbiology*[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2001.  
李 凡, 徐志凯. 医学微生物学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2001.



- 12 P H Kaye. Spatial light-scattering analysis as a means of characterizing and classifying non-spherical particles[J]. Measurement Science & Technology, 1998, 9(2): 141-149.
- 13 P H Kaye, E Hirst, J M Clark, *et al.*. Airborne particle shape and size classification from spatial light-scattering profiles[J]. Journal of Aerosol Science, 1992, 23(6): 597-611.
- 14 C Stopford, P H Kaye, R S Greenaway, *et al.*. Real-time detection of airborne asbestos by light scattering from magnetically re-aligned fibers[J]. Optics Express, 2013, 21(9): 11356-11367.
- 15 Y L Pan, K B Aptowicz, R K Chang, *et al.*. Characterizing and monitoring respiratory aerosols by light scattering[J]. Optics Letters, 2003, 28(8): 589-591.
- 16 Y L Pan, M J Berg, S Zhang, *et al.*. Measurement and autocorrelation analysis of two-dimensional light-scattering patterns from living cells for label-free classification[J]. Cytometry Part A, 2011, 79A(4): 284-292.
- 17 Shao Shiyong, Huang Yinbo, Rao Ruizhong. Aerosol particle shape and scattering analyzer based on imaging[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(3): 704-708.  
邵士勇, 黄印博, 饶瑞中. 基于成像法的气溶胶粒形和散射分析仪[J]. 光子学报, 2009, 38(3): 704-708.
- 18 Feng Chunxia, Huang Lihua, Zhou Guangchao, *et al.*. Computation and analysis of light scattering by monodisperse biological aerosols[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2592-2598.  
冯春霞, 黄立华, 周光超, 等. 单分散生物气溶胶光散射特性的计算与分析[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2592-2598.
- 19 H E Redmond, K D Dial, J E Thompson. Light scattering and absorption by wind blown dust: theory, measurement and recent data [J]. Aeolian Research, 2010, 2(1): 5-26.
- 20 Wang Yawei. Light Scattering Theory and Application Technology[M]. Beijing: Science Press, 2013.  
王亚伟. 光散射理论及其应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- 21 Philip Lavender. MiePlot v4305[OL]. <http://www.philiplaven.com/mieplot.htm> [2014-9-5].
- 22 Michael I Mishchenko, Larry D Travis, Andrew A Lacis, *et al.*. Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.  
米先科, 特拉维斯, 拉齐斯, 等. 微粒的光散射、吸收和发射[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- 23 P H Kaye, E Hirst, Z W Thomas. Neural-network-based spatial light-scattering instrument for hazardous airborne fiber detection [J]. Applied Optics, 1997, 36(24): 6149-6156.
- 24 G F Crosta, Y L Pan, G Videen, *et al.*. Discrimination of airborne material particles from light scattering (TAOS) patterns[C]. SPIE, 2013, 8723: 872318.
- 25 Chunxia Feng, Lihua Huang, Jianbo Wang, *et al.*. Theoretical studies on bioaerosol particle size and shape measurement from spatial scattering profiles[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(9): 092901.
- 26 Zhang Pei, Zhao Yongkai, Yang Wei, *et al.*. Development of a virtual impactor for submicron particles [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0116002.  
张 佩, 赵永凯, 杨 巍, 等. 亚微米粒子虚拟冲击器的研制[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0116002.
- 27 A K Singh, A M Bettasso, E Bae, *et al.*. Laser optical sensor, a label-free on-plate salmonella enterica colony detection tool[J]. mBio, 2014, 5(1): e01019-13.

栏目编辑: 刘丰瑞