

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.05.001

气溶胶单粒子的偏振散射特性研究

陈旭^{1,2}, 丁蕾^{1*}, 王颖萍¹, 郑海洋¹, 方黎¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光谱实验室 安徽 合肥 230031;

2 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要: 建立了气溶胶单粒子的偏振散射实验装置, 采用 T-matrix 方法模拟球形粒子和长形粒子的光散射计算, 讨论了偏振强度因子 (P_f) 和穆勒矩阵元素 (Z_{11} 、 Z_{12}) 随粒径、形状的变化关系, 结果表明, 球形粒子和杆状粒子的 P_f 和 Z_{12} 随着粒径的增大存在明显差异。通过对单分散的气溶胶颗粒物样品的实验测量, 得到不同样品的 P_f 值和 Z_{12} 。实验结果表明, 以油酸粒子的 Z_{12} 为基准, 差值 $\Delta Z_{12}=12$ 可以作为球形的油酸粒子和长形的核黄素以及石棉纤维的区分阈值, ΔZ_{12} 介于 12~41 主要为核黄素粒子, ΔZ_{12} 达到 59 时粒子可被认为是长形的石棉纤维粒子, 而立方形的 NaCl 气溶胶粒子的 ΔZ_{12} 与油酸粒子非常接近, 难以区分。初步实验表明, 穆勒矩阵元素 Z_{12} 可以用于识别长形粒子, 该研究为颗粒物形态的偏振测量提供依据。

关键词: 偏振; 气溶胶; 光散射; 形态; T-matrix 算法

中图分类号: O436.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)05-0321-09

Investigation of Polarization Scattering Characteristics of Single Particle Aerosols

CHEN Xu^{1,2}, DING Lei^{1*}, WANG Yingping¹, ZHENG Haiyang¹, FANG LI¹

(1 Laboratory of Environmental Spectroscopy, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: An experimental device for the polarization scattering of aerosol single particles is developed. The T-matrix method is used to simulate the light scattering calculation of spherical particles and long particles. The relationship between polarization intensity factor (P_f), Müller matrix elements (Z_{11} and Z_{12}) with particle size and shape is discussed. The results show that, with the increase of particle size, there are significant differences between spherical particles and rod-shaped particles in parameters P_f and Z_{12} . By experimental measurement,

基金项目: Supported by National Natural Science Foundation of China(国家自然科学基金, 41275132)

作者简介: 陈旭 (1992 -), 男, 湖北襄阳人, 研究生, 主要从事大气气溶胶粒子光散射特性方面的研究。

E-mail: 13237145203@163.com

导师简介: 方黎 (1964 -), 男, 安徽安庆人, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光光谱、质谱及其在环境污染痕量检测中的应用等方面的研究。 **E-mail:** FANGLI@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2018-04-17; **修改日期:** 2018-05-04

* **通信联系人.** E-mail: dinglei@aiofm.ac.cn

P_f values and Z_{12} of different samples are obtained. The experimental results show that, using the Z_{12} of oleic particles as the reference, the difference $\Delta Z_{12}=12$ can be used as the distinguishing threshold for spherical oleic acid particles and ellipsoidal riboflavin particles and long asbestos fibers particles. The ΔZ_{12} of riboflavin particles ranges from 12 to 41, and when ΔZ_{12} reaches 59, the particles can be considered as asbestos fiber particles. However, it's hard to distinguish cubic NaCl particles and oleic acid particles because the values Z_{12} of each are very similar. Preliminary experiments show that Müller matrix element Z_{12} can be used to identify long particles, which can help to design morphology measurement instrument with polarization method.

Key words: polarization; aerosol; light scattering; morphology; T-matrix method

1 引 言

大气颗粒物的光学特性与其尺寸、形状、组成成分、浓度以及悬浮在空气中的液体及固体颗粒的内部结构(这些决定了颗粒物在大气中的各种行为,包括生成与消失、迁移的沉降等)等密切相关,可用于颗粒物的追踪溯源^[1]。研究颗粒物的光散射问题,可获得丰富的粒子形态信息。在气溶胶粒子的光学诊断技术中^[2],弹性光散射提供的信号最强,远大于非弹性散射的荧光或者拉曼光,广泛用于基于粒形与尺寸的颗粒物种类识别、环境大气污染探测、工作场所的气溶胶粒子检测等方面^[3-7]。理论研究表明,颗粒物的散射光的偏振探测有望作为更为强大的技术,用于生物活性气溶胶颗粒的识别。

2010年 Carrieri 等^[8]在 9.1~12 μm 红外波段,使用差分吸收穆勒矩阵光谱仪测试了枯草芽孢杆菌、蛋清蛋白以及灰尘、水汽的偏振光谱,结合人工神经网络分析了偏振特性差异,该项研究作为离线分析探测,主要研究的偏振参数为穆勒矩阵 16 个元素。2008年 Richardson^[9]使用偏振雷达遥测气溶胶的偏振散射信号(散射角为 $0^\circ \sim 180^\circ$),通过将实验测得的斯托克斯向量重组,得到六个光学偏振态,与下一矩阵结果进行对比,实验结果和理论计算基本符合。Zubko 等^[10]采用离散偶极子近似(Discrete dipole approximation, DDA)研究了不同初始形状的颗粒物聚合体的后向散射偏振特性。研究认为,后向散射光的偏振态对散射系统进行了补充。随着颗粒物单体的纵横比增加,退偏振效果明显。2014年 Redding 等^[11]通过对乙烯小球聚合体、枯草芽孢杆菌、亚利桑那公路尘土聚合体以及色氨酸等样品近后向($155^\circ \sim 180^\circ$)角分辨散射强度实验测量。可以观察到不同粒形、密度的样品的偏振比差别,结果预示偏振纵横比在近后向散射可以作为指纹探测,用来识别由不同颗粒物构成的聚合体。

国内也有不少研究小组开展了气溶胶颗粒物的偏振特性研究。吴良海等^[12]利用米氏散射理论分析尘埃微粒、 O_2 、水滴等的散射和偏振特性,研究典型气态分子和非气态粒子偏振度及散射光强随散射角度的变化规律。李寒霜等^[13]为提高仪器整机性能及遥感数据反演质量,分析了仪器光学系统膜系对偏振的影响。徐赤东等^[14]在米散射微冲激光雷达(Micro-pulse lidar, MPL)的基础上增加了退偏振测量功能,同时测量气溶胶消光系数和粒子浓度的空间分布,并用于区分球形和非球形粒子。云龙龙等^[15]通过微脉冲偏振激光雷达获得了无锡市气溶胶消光和退偏参数,分析了霾形成过程中大气污染物的特征。国内有关颗粒物的偏振特性研究更多立足于大气探测和空间遥感探测领域、以及颗粒物的偏振特性对整体探测研究反演的影响。2009年,邵士勇等^[16]设计了基于成像法的气溶胶粒形和散射分析仪,拍摄到了棉絮纤维的显微放大图像并检测到散射光的强度和偏振的变化。

本文基于系列大气颗粒物的近前向光散射特性研究^[17-20]基础之上,在自行搭建的大气颗粒物近前向散射光测量的实验装置上,通过单分散和多分散颗粒物样本的实验测量,基于米散射理论和 T-matrix 方法的颗粒物光散射计算,获得颗粒物近前向散射光强度与粒子形状的关系。以此为基础,将线偏振的入射

光源通过光学整合, 分成水平偏振和垂直偏振距离约为 $100\ \mu\text{m}$ 的两个光束, 研究两束偏振方向正交垂直的光作用于颗粒物的偏振信号特征, 试图通过分析颗粒物的偏振散射信息, 提高颗粒物光散射特征研究的识别能力。

2 实验装置与方案

2.1 实验装置

项目组自行设计搭建了气溶胶单粒子的偏振散射探测装置。实验装置分为气溶胶透镜进样, 光学测量区, 信号接收存储分析单元。图 1 为气溶胶单粒子偏振散射探测装置的实验示意图。实验使用的光源是线性偏振的 $650\ \text{nm}$ 二极管激光器, 光束经过钽酸钷 (YVO_4) 晶体的双折射后, 被分成水平偏振 (x 向) 和垂直偏振 (y 向) 距离约为 $100\ \mu\text{m}$ 的两个光束。颗粒物样品被主动吸入后, 经过空气动力学透镜进入光学测量区, 气溶胶颗粒被间距约为 $100\ \mu\text{m}$ 的两束连续激光束 (红色 $650\ \text{nm}$, 由同一个二极管激光器产生) 击中, 来自这两束激光的气溶胶粒子弹性散射光信号经球面镜聚焦反射后, 经过两个透镜的整形和传输被雪崩光电二极管 (avalanche photodiode, APD) 接收, 再由多通道高速宽带数字示波器 (WaveRunner104Xi-A, LeCroy, 美国) 采集。

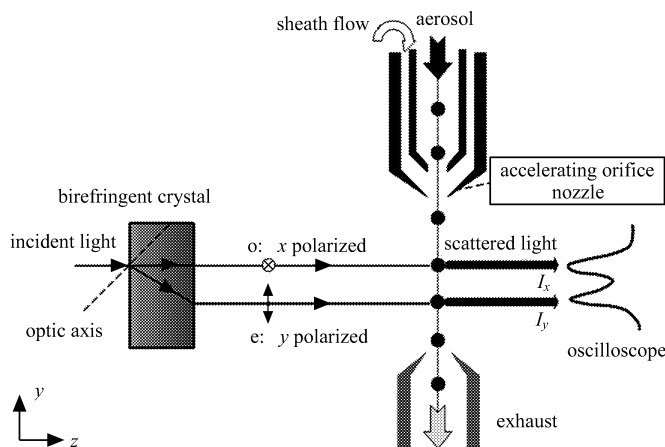


图 1 气溶胶单粒子的偏振散射探测实验示意图

Fig.1 Experimental setup for polarization scattering of single particle

示波器显示和采集的偏振散射信号为双峰信号, 两个信号分别来源于水平偏振和垂直偏振的光斑击中颗粒物产生的散射信号, 通过 APD 接收, 光信号转换为电信号。

2.2 实验方案

实验测量单分散和多分散气溶胶样品的偏振散射信号强度。单分散气溶胶样品选择油酸, 由振动孔气溶胶粒子发生器 (VOGA3450, TSI, 美国) 产生不同粒径的单分散测试粒子。多分散气溶胶样品选择不同粒形的颗粒物, 如球形颗粒物油酸, 方型颗粒物 NaCl 以及长杆型颗粒物核黄素等。多分散气溶胶由实验室自制的喷雾型多分散气溶胶发生器产生。

使用空气动力学粒度谱仪 (APS3321, TSI, 美国) 测量校准粒径信息。由于测量的是空气动力学粒径 (D_a), 因此在计算粒径分布时, 需要将其转化为几何等效粒径^[21], 即

$$D_a = D_e \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_0 \chi}}, \quad (1)$$

式中 ρ_p 是气溶胶粒子的密度, $\rho_0 = 1.0 \text{ g/cm}^{-3}$, 动态形状因子 χ 是粒子纵横比的函数。表 1 为油酸、NaCl、核黄素和石棉纤维的物理参数。通过图 1 所示实验装置对这四种气溶胶的散射光强进行探测, 探测器接收范围为中心位于 $(135^\circ, 0^\circ)$ 、散射极角为后向 $45^\circ (\theta=135^\circ)$ 、方位角为 $\phi = 0^\circ$ 、半角宽为 35° 的圆形区域, 分别记录粒子对两束正交偏振的入射光的散射光光强, 并对其进行分析。

表 1 油酸、NaCl、核黄素和石棉纤维气溶胶物理参数

Table 1 Physical parameters of oleic acid, NaCl, riboflavin and asbestos fiber

Species	Shape	Refraction index	Density(g/cm ³)
oleic acid	sphere	1.4582	0.8935
NaCl	cube	1.5542	2.165
riboflavin	spheroid	1.73	1.65
asbestos fiber	elongate	1.5~1.6	~2.5

3 基于 T-matrix 的颗粒物偏振光散射截面计算方法

在实验室坐标系 $L(x, y, z)$ 中, 颗粒物光散射过程涉及的入射光与散射光电矢量方向如图 2 所示。一般设定入射光矢量 \mathbf{n}^{inc} 与 z 轴方向一致, 散射光矢量 \mathbf{n}^{sca} 与 z 轴构成的平面定义为散射平面, 并可分解为与该平面平行的电矢量 \mathbf{e}_{\parallel} 及垂直的电矢量 \mathbf{e}_{\perp} 。

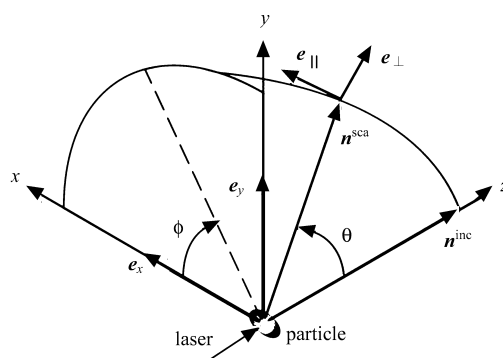


图 2 光散射坐标系示意图

Fig.2 Light scattering coordinate system

依据 T-matrix 理论计算方法中的定义, 在远场区域, 散射光波与入射光波电矢量的关系为^[22]

$$\begin{bmatrix} E_{\theta L}^{\text{sca}} \\ E_{\phi L}^{\text{sca}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{\parallel}^{\text{sca}} \\ E_{\perp}^{\text{sca}} \end{bmatrix} = \frac{\exp(ikR)}{R} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_x^{\text{inc}} \\ E_y^{\text{inc}} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中 R 为散射接收位置离原点的距离, $k = 2\pi/\lambda$ 为自由空间波数, $S_{ij} (i, j = 1, 2)$ 为实验室坐标系下的光散射振幅矩阵元素, 由极角 θ 、方位角 ϕ 及轴对称粒子对称轴取向的欧拉角 (α, β, γ) 决定, 是 T-matrix 方法^[23] 的主要计算量。

在颗粒物光散射计算中, 一般设定入射光沿实验室坐标系 z 轴正方向传播, 即入射光极角 θ^{inc} 和方位角 ϕ^{inc} 都等于 0, 任意偏振的入射光可分解为相互垂直的两个电矢量 \mathbf{e}_x 与 \mathbf{e}_y , 散射光与入射光的关系如式 (2) 所示。当入射光沿 x 轴偏振时, 有

$$E_{\parallel}^{\text{sca}} = \frac{\exp(ikr)}{r} S_{11} E_x, \quad E_{\perp}^{\text{sca}} = \frac{\exp(ikr)}{r} S_{21} E_x, \quad (3)$$

总散射光强为

$$I^{\text{sca}} = E_{\parallel}^{\text{sca}} E_{\parallel}^{\text{sca}*} + E_{\perp}^{\text{sca}} E_{\perp}^{\text{sca}*} = \frac{1}{r^2} (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2) I_x^{\text{inc}}. \quad (4)$$

更便于描述散射性质的是 4×4 穆勒矩阵 (相矩阵), 它将入射光与散射光的斯托克斯参量联系起来 [23-24]

$$\begin{bmatrix} I^{\text{sca}} \\ Q^{\text{sca}} \\ U^{\text{sca}} \\ V^{\text{sca}} \end{bmatrix} = \frac{1}{k^2 r^2} \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^{\text{inc}} \\ Q^{\text{inc}} \\ U^{\text{inc}} \\ V^{\text{inc}} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

穆勒矩阵的 16 个矩阵元都可由振幅矩阵 S_{ij} 的四个矩阵元算出, 如

$$Z_{11} = \frac{1}{2} (|S_{11}|^2 + |S_{12}|^2 + |S_{21}|^2 + |S_{22}|^2), \quad (6)$$

$$Z_{12} = \frac{1}{2} (|S_{11}|^2 - |S_{12}|^2 + |S_{21}|^2 - |S_{22}|^2). \quad (7)$$

当入射光为沿 x 轴偏振的线偏振光时, 结合式 (4)、(6)、(7) 可得微分散射截面为

$$\frac{dC_{\text{sca}}^x}{d\Omega} = \frac{I^{\text{sca}} r^2}{I^{\text{inc}}} = |S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 = Z_{11} + Z_{12}, \quad (8)$$

同理: 当入射光为沿 Y 轴偏振的线偏振光时, 微分散射截面为

$$\frac{dC_{\text{sca}}^y}{d\Omega} = |S_{12}|^2 + |S_{22}|^2 = Z_{11} - Z_{12}. \quad (9)$$

为便于比较入射光为 x 方向偏振与 y 方向偏振的散射强度差异, 定义归一化偏振强度因子 P_f 为

$$P_f = \frac{C_x^{\text{sca}} - C_y^{\text{sca}}}{C_x^{\text{sca}} + C_y^{\text{sca}}} \times 100\% = \frac{Z_{12}}{Z_{11}} \times 100\%. \quad (10)$$

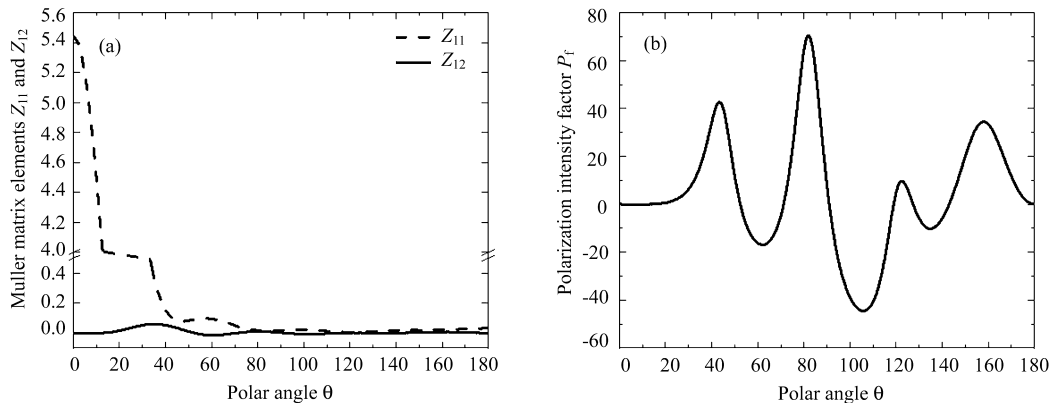


图 3 Z_{11} 、 Z_{12} 和 P_f 随散射极角 θ 的变化情况

Fig.3 Z_{11} 、 Z_{12} and P_f versus scattering angle θ

值得注意的是 P_f 与传统的线性偏振度互为相反数, 与穆勒矩阵元素 Z_{12} 一起具有较强的散射光偏振特性反映能力。 Z_{11} 、 Z_{12} 以及与偏振强度因子 P_f 的计算通过 T-matrix code [25] 实现。图 3 给出直径 1

μm , 折射率为 $n = 1.33$ 的球形颗粒, 在方位角 $\phi = 0^\circ$ 时的单位立体角的 Z_{11} 、 Z_{12} 以及与偏振强度因子 P_f 与极角 θ 的关系 (计算角度间隔 1°)。从图示计算结果可以看到, Z_{11} 及 Z_{12} 或微分散射截面随方位角 θ 的而变化, 如果探测器的视场角较大, 则在探测区域内, 不能采用单一的 (θ, ϕ) 值计算 Z_{11} 及 Z_{12} , 而需要进行积分运算^[18-20]

$$I_{\text{sca}} = I_{\text{inc}} \int_{\phi_0 - \Delta\phi}^{\phi_0 + \Delta\phi} \int_{\theta_0 - \Delta\theta}^{\theta_0 + \Delta\theta} \frac{dC_{\text{sca}}}{d\Omega}(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi, \quad (11)$$

式中 $\frac{dC_{\text{sca}}}{d\Omega}(\theta, \phi)$ 是微分散射截面, (θ_0, ϕ_0) 表示探测器的中心位置, $\Delta\theta$ 是探测器散射角范围的半角宽, $\Delta\phi$ 表示方位角的积分范围, 由探测器的 θ 角范围决定。微分散射截面 $\frac{dC_{\text{sca}}}{d\Omega}(\theta, \phi)$ 是采用 T-matrix 算法计算角度间隔 0.5° 的离散点的散射截面, 每一个离散点对应的方位角和散射角的关系为^[26]

$$\Delta\phi = \cos^{-1} \left(\frac{\cos\Delta\theta - \cos\theta_0 \cos\theta}{\sin\theta_0 \sin\theta} \right), \quad (12)$$

由此计算得到探测器在 $(\theta_0 - \Delta\theta, \theta_0 + \Delta\theta)$ 散射角范围内的方位角范围为 $(\phi_0 - \Delta\phi, \phi_0 + \Delta\phi)$ 。

4 结果与讨论

图 4 和图 5 分别给出了球形粒子和纵横比为 3:1 的长形粒子的穆勒矩阵元素 Z_{11} 和 Z_{12} 以及 P_f 随粒径的变化曲线, 采用 T-matrix 方法模拟探测器位置与实验测量装置一致, 探测器中心位于 $(135^\circ, 0^\circ)$, 散射极角为后向 $45^\circ (\theta = 135^\circ)$, 方位角为 $\phi = 0^\circ$, 探测器半角宽为 35° , 入射光波长 $\lambda = 0.650 \mu\text{m}$, 粒子折射率为 1.4582。

由图 4 可以看出球形粒子和长形粒子的穆勒矩阵元素 Z_{11} 随粒径的增大迅速增大, 而 Z_{12} 与粒径的关系则是随着粒径的增大在零点附近上下浮动。尽管如此, 二者也存在明显差异, 长形粒子 Z_{12} 随粒径的增大变化相对稳定, 球形粒子 Z_{12} 随粒径的增大浮动频率较大, 对粒径的改变更为敏感。

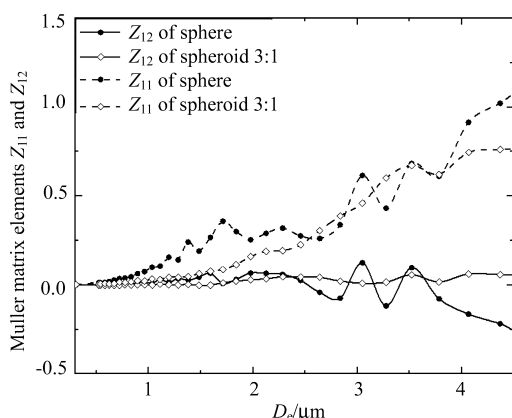


图 4 穆勒矩阵元 Z_{11} 和 Z_{12} 随等效粒径 D_e 的变化曲线

Fig.4 Muller matrix elements Z_{11} and Z_{12} versus Volume-equivalent diameter D_e

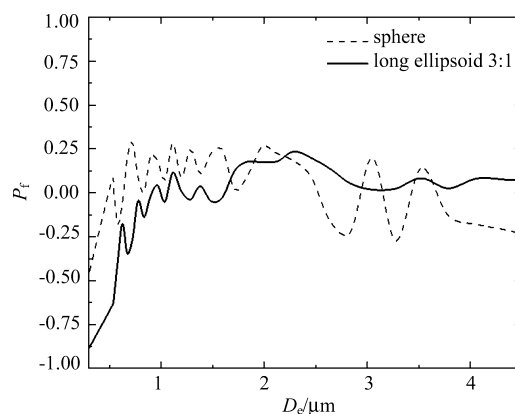


图 5 P_f 随等效粒径 D_e 的变化曲线

Fig.5 P_f versus volume-equivalent diameter D_e

从图 5 的偏振强度因子随等效粒径的变化曲线可以看出, 球形粒子和长形粒子的 P_f 都随粒径的增大在零点附近浮动, 而随着粒径的增大球形粒子随粒径的浮动较大。另外波长量级的粒子 (曲线左端) 对应的 P_f 值小于 0, 这是由于探测器接收 x 轴方向偏振入射光对微小粒子的散射强度小于 y 轴方向偏振入射光对

微小粒子的散射强度造成的。图 4 和图 5 中可以看出, 球形粒子和长形粒子的 P_f 和 Z_{12} 随粒径的变化曲线有明显差异, 有望作为识别参数对球形粒子和长形粒子进行区分。

根据既定实验方案对表 1 中四个样品的 P_f 值和各自散射穆勒矩阵元素 Z_{12} 进行测量。

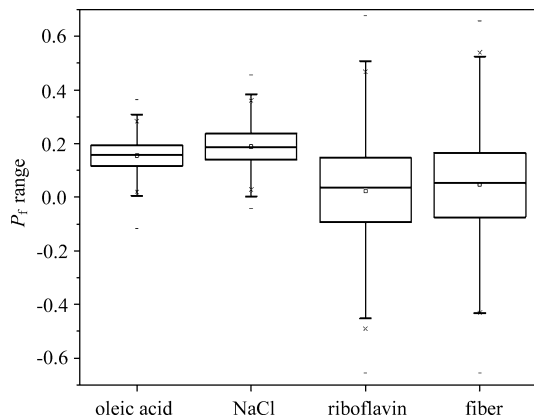


图 6 实验获得的样品 P_f 分布图样

Fig.6 P_f distribution pattern of the samples

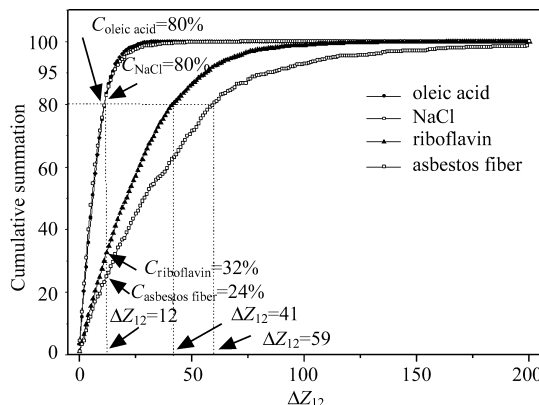


图 7 四种样品的实验获得 ΔZ_{12} 的累计百分比

Fig.7 Cumulative summation plot of ΔZ_{12}

图 6 为实验室实际测量的空气动力学粒径范围 $0.91\sim 1.19 \mu\text{m}$ 的四种样品偏振强度因子 P_f 箱型图分布。可以看出, 球形粒子油酸的 P_f 分布相对集中, 主要在 $0.1\sim 0.2$; NaCl 粒子为立方体, 从 P_f 箱型图分布来看, 与球形粒子非常类似, 主要分布在 $0.15\sim 0.25$; 长型粒子核黄素的 P_f 分布与球形粒子不同, 分布范围主要为从 $-0.1\sim 0.15$; 细长型石棉纤维的 P_f 分布最为分散, 从 $-0.17\sim 0.07$ 。由式 (10) 可知, P_f 与 Z_{11} 和 Z_{12} 有关。

在折射率一定时, Z_{11} 与颗粒物的总散射强度对应, 随粒径增大 Z_{11} 增大很快, 而 Z_{12} 则对应于水平偏振与竖直偏振入射光的散射强度的差异, 对粒径很敏感, 随粒径在零值上下波动。为了更为直观地区分四种样品的偏振信号, 进一步分析实验获得的穆勒矩阵 Z_{12} 的分布规律。表 2 是粒径为 $0.91\sim 1.19 \mu\text{m}$ 四种样品的 Z_{12} 统计分布。

表 2 $0.91\sim 1.19 \mu\text{m}$ 四种样品的 Z_{12} 值统计

Table 2 Statistics of Z_{12} of the four kinds of samples with a range of $0.91\sim 1.19 \mu\text{m}$ in diameter

Species	Total	Mean	Standard Deviation	Median
oleic acid	1941	20.37	9.43	19.18
NaCl	1703	22.04	10.18	20.62
riboflavin	3360	3.84	30.50	5.08
asbestos fiber	583	12.48	58.17	16.13

首先计算油酸的 Z_{12} 平均值, 以其他样本的 Z_{12} 与油酸平均值的差值绝对值 (ΔZ_{12}) 为判据, 绘制 Z_{12} 的累积加权分布图 (如图 7 所示), 考察其他粒形颗粒相对于球形颗粒的识别能力。

从图中四种样品的 ΔZ_{12} 累计百分比曲线观察, 长型粒子核黄素结晶, 以及细长型粒子石棉纤维的分布曲线与球形粒子有明显差异。以 80% 油酸粒子为例 ($C_{\text{oleic acid}} = 0.80$), 即当 $\Delta Z_{12} = 12$ 时, $C_{\text{riboflavin}} = 32\%$, $C_{\text{fiber}} = 24\%$, 说明实验中 $0.91\sim 1.19 \mu\text{m}$ 范围有 $1 - 32\% = 68\%$ 的核黄素颗粒, 有 $1 - 24\% = 76\%$ 的纤维颗粒被识别认为是非球形粒子, 因此可以将 $\Delta Z_{12} = 12$ 作为球形颗粒和非球形颗粒的判别阈值。立方颗粒 NaCl

的 ΔZ_{12} 分布曲线与球形颗粒油酸差别很小, 难以区分。 ΔZ_{12} 介于 12~41 时, 认为是中等长型粒子。当 ΔZ_{12} 达到 59 时, 粒子可以被认为是长型颗粒。

5 结 论

基于自行搭建的气溶胶单粒子偏振散射装置, 对油酸、NaCl、核黄素以及石棉纤维四种样品的散射光进行测量, 并且结合 T-matrix 方法的光散射计算, 讨论了偏振强度因子和穆勒矩阵元素随粒径以及形状的变化关系。结果可知, Z_{12} 随着粒径的增大在零点附近上下波动, 而 Z_{11} 则随粒径增大快速增长; 不同形状的椭球粒子, 例如核黄素和石棉纤维, 纵横比较大时, Z_{12} 与球形粒子差别较大。实验方面可以看出, 油酸和 NaCl 气溶胶粒子散射穆勒矩阵元素 Z_{12} 差别很小, 核黄素和石棉纤维粒子与油酸粒子的散射穆勒矩阵元素 Z_{12} 差别很大, 对于粒径为 0.91~1.19 μm 的油酸、核黄素以及石棉纤维粒子, $\Delta Z_{12} = 12$ 可以作为判别阈值, 将球形的油酸粒子和非球性的核黄素以及石棉纤维粒子区分开, ΔZ_{12} 介于 12~41 可认为是中长形粒子, ΔZ_{12} 达到 59 时, 粒子可被认为是长形。初步实验说明, Z_{12} 可用于识别长形粒子。

参考文献:

- [1] Kokhanovsky A A. *Aerosol Optics: Light Absorption and Scattering by Particles in the Atmosphere* [M]. Chichester: Praxis Publishing Ltd., 2008.
- [2] Signorell R, Reid J P. *Fundamentals and Applications in Aerosol Spectroscopy* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [3] Kaye P H. Spatial light-scattering analysis as a means of characterizing and classifying non-spherical particles [J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, **9**(2): 141-149.
- [4] Kaye P H, Alexander-Buckley K, Hirst E, et al. A real-time monitoring system for airborne particle shape and size analysis [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, **101**(D14): 19215-19221.
- [5] Pan Y L, Berg M J, Zhang S S M, 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.
- [6] Shimizu A, Sugimoto N, Matsui I, et al. Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidars in China and Japan during ACE-Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, **109**(D19): D19S17.
- [7] Lee C G, Yuan C S, Chang J C, et al. Effects of aerosol species on atmospheric visibility in Kaohsiung City, Taiwan [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2005, **55**(7): 1031-1041.
- [8] Carrieri A H, Copper J, Owens D J, et al. Infrared differential-absorption Mueller matrix spectroscopy and neural network-based data fusion for biological aerosol standoff detection [J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(3): 382-393.
- [9] Richardson J M, Aldridge J C, Milstein A B. Polarimetric lidar signatures for remote detection of biological warfare agents [C]. *Proceedings of SPIE*, 2008, **6972**: 69720E.
- [10] Zubko E, Shkuratov Y, Hart M, et al. Backscattering and negative polarization of agglomerate particles [J]. *Optics Letters*, 2003, **28**(17): 1504-1506.
- [11] Redding B, Pan Y, Wang C, et al. Polarization resolved angular optical scattering of aerosol particles [C]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **9106**: 91060F.
- [12] Wu L H, Gao J, Fan Z G, et al. Scattering of particles in the atmosphere and their influence on celestial polarization patterns [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 34-40(in Chinese).

- 吴良海,高隽,范之国,等. 大气粒子散射特性及其对空间偏振分布的影响 [J]. 光学学报, 2011, **31**(7): 34-40.
- [13] Li Hanshuang, Li Bo, Wang Shurong. Polarization performance in space ultraviolet remote sensing spectral instruments [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(1): 0112006(in Chinese).
- 李寒霜,李博,王淑荣. 空间紫外遥感光谱仪器偏振特性研究 [J]. 光学学报, 2018, **38**(1): 0112006.
- [14] Xu Chidong, Ji Yufeng. A case study of particulate pollution case measured by Polarization Micro-Pulse Lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2011, **6**(1): 27-32(in Chinese).
- 徐赤冬,纪玉峰. 偏振微脉冲激光雷达测量颗粒物污染变化的个例研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2011, **6**(1): 27-32.
- [15] Yun Longlong, Zhang Tianshu, et al. Analysis of air pollutants during process of a haze in Wuxi City [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2015, **10**(1): 22-30(in Chinese).
- 云龙龙,张天舒,等. 无锡市一次霾形成过程大气污染物特征分析 [J]. 大气与环境光学学报, 2015, **10**(1): 22-30.
- [16] Shao Shiyong, Huang Yinbo, Rao Ruizhong. Aerosol particle shape and scattering analyzer based on imaging [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 704-708(in Chinese).
- 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.
- [17] Wu Jinlei, Zhang Jinbi, Zhang Li, et al. Near forward light scattering characteristics of airborne particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(5): 0529001(in Chinese).
- 吴金雷,张金碧,张莉,等. 大气颗粒物近前向光散射特性研究 [J]. 光学学报, 2016, **36**(5): 0529001.
- [18] Zhang J B, Ding L, Wang Y P, et al. Theoretical studies on particle shape classification based on simultaneous small forward angle light scattering and aerodynamic sizing [J]. *Chinese Physics B*, 2016, **25**(3): 034201.
- [19] Zhang J B, Ding L, Wang Y P, et al. Shape classification of single aerosol particle using near-forward optical scattering patterns calculation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(5): 054202.
- [20] Ding L, Zhang J B, Zheng H Y, et al. A method of simultaneously measuring particle shape parameter and aerodynamic size [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **139**: 87-97.
- [21] DeCarlo P F, Slowik J G, Worsnop D R, et al. Particle morphology and density characterization by combined mobility and aerodynamic diameter measurements. Part 1: Theory [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2004, **38**(12): 1185-1205.
- [22] Mishchenko M I. Calculation of the amplitude matrix for a nonspherical particle in a fixed orientation [J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(6): 1026-1031.
- [23] Mishchenko M I, Travis L D, Lacis A A. *Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [24] Bohren C, Huffman D. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* [M]. New York: Wiley, 1983.
- [25] Mishchenko M I, Travis L D. T-matrix codes for computing electromagnetic scattering by nonspherical and aggregated particles [OL]. <https://www.giss.nasa.gov/staff/mmishchenko/t-matrix.html>.
- [26] Heyder J, Gebhart J. Optimization of response functions of light scattering instruments for size evaluation of aerosol particles [J]. *Applied Optics*, 1979, **18**(5): 705-711.