

文章编号: 0258-7025(2010)10-2592-07

单分散生物气溶胶光散射特性的计算与分析

冯春霞^{1,2} 黄立华¹ 周光超^{1,2} 韩 杰^{1,2} 曾爱军¹ 赵永凯¹ 黄惠杰¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 基于回转长椭球模型与球形模型, 采用 T 矩阵法, 讨论了非球形气溶胶颗粒的形状对散射相函数的影响; 计算了葡萄球菌、鼠疫耶尔森氏杆菌、土拉热杆菌、志贺杆菌及类鼻疽伯克霍尔德菌等 5 种单分散生物气溶胶颗粒 Stokes 散射矩阵中各元素的角度分布曲线, 讨论了非球形颗粒的粒径和形状对不同矩阵元素的影响。对于等消光截面颗粒, 颗粒形状的变化对前向小角度与侧向两个散射区域的散射相函数几乎无影响, 可以用球形颗粒近似模拟; 非球形气溶胶颗粒的 $F_{11}(\theta)$ 在 $170^\circ \sim 180^\circ$ 内的积分与在 $0^\circ \sim 10^\circ$ 内的积分的比值随着纵横比的增大而增大, 可以表征颗粒的形状。对于不同尺寸和形状的气溶胶颗粒, $[F_{11}(0^\circ) - F_{11}(5^\circ)]/5$ 随着等表面积球半径的增大而增大, $F_{11}(\theta)$ 在 $170^\circ \sim 180^\circ$ 内的积分与在 $0^\circ \sim 10^\circ$ 内的积分的比值以及 $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 内的积分随着纵横比的增大而增大, 这些特性可用于判断颗粒的尺寸和形状。研究结果为颗粒粒径及粒形测量仪器的设计以及空气中有害微生物的快速探测提供了依据。

关键词 光散射; 生物气溶胶; T 矩阵; 散射矩阵元素; 纵横比

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103710.2592

Computation and Analysis of Light Scattering by Monodisperse Biological Aerosols

Feng Chunxia^{1,2} Huang Lihua¹ Zhou Guangchao^{1,2} Han Jie^{1,2}
Zeng Aijun¹ Zhao Yongkai¹ Huang Huijie¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The T-matrix method is used numerically to calculate the light scattering patterns of monodisperse, randomly oriented, non-spherical biological aerosol particles based on prolate spheroidal and spherical models in order to obtain size and shape sensitive information. The shape dependence of the phase function for the biological aerosol particles is discussed. The angular distributions of light scattered by Staphylococcus, Yersinia pestis, Francisella tularensis, Shigella dysenteriae and Burkholderia pseudomallei are presented and the size and shape dependence of the scattering matrix elements are illustrated in detail. At the forward- and side-scattering angles, the phase function has little dependence on particle shape for particles with equal extinction cross-section. It indicates that spherical model can be used to model non-spherical particles at these regions. The ratio of integrated backward-scattering at $170^\circ \sim 180^\circ$ of $F_{11}(\theta)$ to integrated forward-scattering at $0^\circ \sim 10^\circ$ increases with the increases of the aspect ratio for non-spherical particles, which can be used to characterize particle shape. For aerosols of different sizes and shapes, the forward-scattering steepness $[F_{11}(0^\circ) - F_{11}(5^\circ)]/5$ of $F_{11}(\theta)$ increases with surface-equivalent radius, which provides theoretical basis for particle size detection. The ratio of integrated scattering at $170^\circ \sim 180^\circ$ to integrated scattering at $0^\circ \sim 10^\circ$ of $F_{11}(\theta)$ as well as integrated scattering at $30^\circ \sim 90^\circ$ of $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$ increases with the aspect ratio, which can be used to determine the shape of particles. The study results in this paper provide a theoretical foundation to the design of particle size and shape analysis apparatus and the fast and effective detection of harmful

收稿日期: 2010-01-05; 收到修改稿日期: 2010-03-11

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX10401)资助课题。

作者简介: 冯春霞(1982—), 女, 博士研究生, 主要从事精密光学测量技术方面的研究。E-mail: cx.feng3210@163.com

导师简介: 黄惠杰(1966—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学生物传感器、光学检测技术和光学光刻技术等方面的研究。

E-mail: huanghuijie@siom.ac.cn(通信联系人, 中国光学学会会员号: 040111113)

biological micro-organisms in the air.

Key words light scattering; biological aerosol; T-matrix; scattering matrix element; aspect ratio

1 引言

生物气溶胶是生物武器施放的主要形式。生物气溶胶在大气中的扩散、传播会引起人类急性和慢性疾病以及动植物疾病的流行和传播,其探测和识别是一项复杂而艰巨的任务,在军事、安全、空气污染、环境质量的评估以及人类健康等方面发挥着至关重要的作用。因此,非常有必要对生物气溶胶进行检测、识别、确认和疫情性质判断。

光学方法是探测生物气溶胶颗粒的一种有效的方法。与非生物颗粒不同的是,生物气溶胶的颗粒中含有核黄素(Riboflavin)、烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(Nicotinamide adenine nucleotides phosphate, NAD(P)H)和色氨酸(Tryptophan)等荧光团^[1],这些物质在紫外光激发下会发出本征荧光,通过测量其荧光强度可区分生物颗粒与非生物颗粒,但不足以判断是否存在生物战剂的威胁^[2]。常见的生物战剂颗粒的尺寸与形状是已知的,如果能同时测量颗粒的大小与形状,就能较准确地判断生物战剂的种类。基于光散射原理的空气动力学粒径仪以及光散射式颗粒测量仪,可对待测颗粒进行分档计数以及浓度监控,但其颗粒散射特性的计算通常基于球形假设,应用经验公式以及 Mie 散射理论得出等效粒径^[3],并未考虑粒形的影响。然而大多数致病菌以非球形杆菌为主,两种不同形状和尺寸的颗粒可能具有相同的等效粒径,从而产生误报警,因此有必要对其在形状上进行区分^[4]。光散射取决于颗粒的尺寸、形状、复折射率、颗粒取向、光源等,当其中一些变量确定时,就可获得散射体形状的信息。

非球形颗粒的散射一般没有解析解,通常借助数值解或近似解来分析,T 矩阵方法被广泛应用于颗粒的光散射计算中。T 矩阵方法是对任意形状散射体的 Maxwell 方程的严格解析解,可用于研究单个和群聚非球形颗粒的散射问题。T. Nousiainen 等^[5]用 T 矩阵方法计算了在波长为 0.6328 μm 的光照射下大气中椭球形长石颗粒的散射矩阵,得到了与实验测量相一致的结果;H. Volten 等^[6, 7]基于 T 矩阵法分别在波长为 0.4416 μm 和 0.6328 μm 的光照射下测量了几十种非球形矿物气溶胶颗粒,15 种水溶胶颗粒以及 2 种沉积物的散射矩阵;M. I. Mishchenko 等^[8]论述了弱吸收条件下椭球形颗粒散射相函数随纵横比和尺寸参数的变化关系;邵士

勇等^[9]以冰晶、沙尘和碳黑等典型气溶胶粒子为例,应用 T 矩阵方法,探讨了单分散长椭球形气溶胶粒子的散射相函数随纵横比、尺度参数和折射率的变化规律。

本文基于 T 矩阵法用回转长椭球模型和球形模型研究球形和非球形生物战剂气溶胶颗粒的散射特性,为快速探测空气中有害微生物提供依据。

2 T 矩阵相关理论

气溶胶中分布着大量的微小颗粒,且颗粒不断运动变化,近似于随机取向的特征,因而可视为宏观上各向同性,则其 Stokes 散射矩阵与入射光和散射光的具体方向无关,而由入射光与散射光方向的相对夹角 θ 决定,此时的 Stokes 散射矩阵 $\mathbf{F}(\theta)$ 具有分块对角的结构,相应颗粒群的散射矩阵为

$$\mathbf{F}(\theta) = \begin{bmatrix} F_{11}(\theta) & F_{12}(\theta) & 0 & 0 \\ F_{12}(\theta) & F_{22}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{33}(\theta) & F_{34}(\theta) \\ 0 & 0 & -F_{34}(\theta) & F_{44}(\theta) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

颗粒光散射问题归结为其 Stokes 散射矩阵的求解^[10]。

Stokes 散射矩阵描述了颗粒光散射时入射光至各角度上散射光的传递关系,其元素描述了颗粒光散射的各项特征,各元素值取决于颗粒的形貌特征、相对于入射光波长的尺度大小以及颗粒成分等因素。对于球形颗粒,其 Stokes 散射矩阵具有 $F_{22}(\theta) = F_{11}(\theta)$ 与 $F_{44}(\theta) = F_{33}(\theta)$ 的特征。而对于非球形颗粒,该等式不成立, $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 偏离 1 的多少反映了颗粒光散射过程中其非球形性影响的程度。 $-F_{12}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 表示散射光的偏振度,且 $|-F_{12}(\theta)/F_{11}(\theta)| \leq 1$ 。散射矩阵的所有元素均为实数,且具有面积的量纲^[11]。散射相函数 $F_{11}(\theta)$ 反映了颗粒散射光强的空间分布特征,可通过探测散射光强的角分布直接测得;Stokes 散射矩阵其他元素可通过波片与偏振片等光学器件组合进行间接测量^[7, 12]。为讨论问题的方便,分析相函数 $F_{11}(\theta)$ 以及散射矩阵各元素与 $F_{11}(\theta)$ 的比值,即 $F_{11}(\theta)$, $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$, $F_{33}(\theta)/F_{11}(\theta)$, $F_{44}(\theta)/F_{11}(\theta)$, $-F_{12}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 和 $F_{34}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 。

散射截面和消光截面是描述颗粒特性的最基本

最重要的参数。散射截面 C_{sca} 与入射光能流密度的乘积等于入射光的光强由于颗粒向各方向的散射而导致的减少量,即该乘积反映了颗粒在所有方向上散射光强的总和

$$C_{\text{sca}} = \frac{1}{I_{\text{inc}}} \int_{4\pi} d\hat{n}^{\text{sca}} I^{\text{sca}}(\hat{n}^{\text{sca}}), \quad (2)$$

式中 \hat{n}^{sca} 为散射方向单位矢量。

同理,消光截面 C^{ext} 与入射光能流密度的乘积等于入射光的光强由于颗粒对光的散射与吸收综合作用而导致的减少量,即消光截面是散射截面与吸收截面的总和

$$C^{\text{ext}} = \frac{1}{I_{\text{inc}}} [K_{11}(\hat{n}^{\text{inc}})I^{\text{inc}} + K_{12}(\hat{n}^{\text{inc}})Q^{\text{inc}} + K_{13}(\hat{n}^{\text{inc}})U^{\text{inc}} + K_{14}(\hat{n}^{\text{inc}})V^{\text{inc}}], \quad (3)$$

式中 \hat{n}^{inc} 为入射方向单位矢量, I^{inc} , Q^{inc} , U^{inc} , V^{inc} 为 Stokes 参数, $K_{ij}(\hat{n}^{\text{inc}})$ 为消光矩阵元素^[13]。

表 1 5 种生物战剂气溶胶颗粒的尺寸、形状及所致疾病

Table 1 Sizes and shapes of five biological agent aerosol particles and diseases caused by them

Biological agent	Disease	Shape	Size ($W \times L$) / μm	a / μm	b / μm	a/b	r_s / μm
ST	Toxic syndromes	Sphere	0.8~1.0	0.9	0.9	1	0.9
YP	Plague	Spheroid	(0.8~1.0) × (1.1~1.3)	0.85	1.15	0.7391	0.9474
FT	Tularemia	Spheroid	0.5 × 1.0	0.5	1.0	0.5	0.6537
SD	Shigellosis	Spheroid	(0.5~0.7) × (2~3)	0.7	2.0	0.35	1.0731
BP	Melioidosis	Spheroid	(0.4~0.5) × (1.2~2.0)	0.4	1.5	0.2667	0.6964

3.2 折射率的选取

折射率是影响生物气溶胶颗粒光散射特性的重要参数之一。P. S. Tuminello 等^[17] 和 K. F. A. Ross 等^[18] 实验测量了波长 $\lambda = 0.589 \mu\text{m}$ 时枯草杆菌的折射率,随着颗粒尺寸参数的变化,折射率实部的值在 1.51~1.54 之间,虚部具有 10^{-2} 的数量级。气溶胶的等效粒径一般在 $0.6 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间^[19],在可见光波长下,当折射率在一定范围内变化时,散射矩阵只有微小的改变,折射率的轻微波动并不影响研究气溶胶的散射特性^[17,19~21]。各种生物战剂气溶胶颗粒的组成成分相似^[22],因此在 $0.6328 \mu\text{m}$ 的入射光波长下,可选择 $m = 1.52 + 0.017i$ 作为其折射率^[5,23]。

4 颗粒消光截面相等时散射相函数随纵横比的变化

以鼠疫耶尔森氏杆菌 ($a/b = 0.7391$, $r_s = 0.9474 \mu\text{m}$, $C_{\text{ext}} = 6.9502 \mu\text{m}^2$) 为例,计算与其消光截面相等、形状不同的生物气溶胶颗粒的散射相函数,分析颗粒形状对散射相函数的影响。其他与之等消光截面的颗粒的纵横比分别为 0.6, 0.8, 0.9 和

3 生物气溶胶颗粒模型的建立

3.1 形状模型

生物战剂气溶胶是倍受关注的生物武器。被使用过或已标准化的生物战剂共计 6 类 28 种^[14],选择其中 5 种进行分析,分别为葡萄球菌 (*Staphylococcus*, ST)、鼠疫耶尔森氏杆菌 (*Yersinia pestis*, YP)、土拉热杆菌 (*Francisella tularensis*, FT)、志贺杆菌 (*Shigella dysenteriae*, SD)、类鼻疽伯克霍尔德菌 (*Burkholderia pseudomallei*, BP)^[15]。这些生物战剂均可通过气溶胶或者污染的灰尘而使人感染致病^[16]。不同生物战剂气溶胶颗粒具有不同的形状和大小,因此可以作为分类鉴定的依据或参考。其所引起的疾病以及回转长椭球模型的尺寸和形状如表 1 所示,其中 a, b 为典型的椭球沿水平轴和垂直轴的半轴长, r_s 为其等表面积球半径。

1. r_s 为等消光截面颗粒所对应的等表面积球半径。计算得到的散射相函数 $F_{11}(\theta)$ 随散射角的变化曲线如图 1(a) 所示。

从图 1(a) 可以看出,随着纵横比的增大,散射相函数的振荡越来越激烈,且接近球形颗粒的散射特征;纵横比小于某一特定值(0.8 左右)后,振荡特性逐渐消失。气溶胶颗粒的前向散射 ($0^\circ \sim 20^\circ$) 对形状不敏感,不同形状气溶胶颗粒的前向散射几乎一致,这主要是因为前向散射以衍射为主,而衍射取决于颗粒的几何投影面积,等消光截面颗粒的几何投影面积相同,因此,前向散射的大小可以表征颗粒粒径,这为粒径测量提供了理论基础;随着散射角的增大,不同纵横比气溶胶颗粒的近前向 ($20^\circ \sim 80^\circ$) 散射之间的差异变得明显,振荡幅度随着纵横比 a/b 的增大而显著增大,并逐渐接近球形颗粒散射 ($a/b = 1$) 特征,但振荡趋势基本一致。颗粒形状对散射相函数的侧向散射 ($80^\circ \sim 100^\circ$) 影响很小,等效粒径相同的颗粒在该区域的散射光强几乎相同,且在实际的测量装置中采用侧向散射方式易于避开入射光的干扰而提高探测灵敏度,因此,许多基于经典光散射法的颗粒粒径测量仪器都通过接收 90° 方向的散射光

信号而对粒径进行测量^[24,25]；不同形状的气溶胶颗粒的散射相函数在后侧向散射区(100°~150°)的差别较明显,振荡幅度随着纵横比的增大而显著减小；而在后向散射区(150°~180°), $F_{11}(\theta)$ 的振荡幅度随着纵

横比的增大而增大。计算发现,非球形气溶胶颗粒的散射相函数在 170°~180°内的积分与在 0°~10°内的积分的比值随着纵横比的增大而增大,这使颗粒形状的区别一目了然,如图 1(b)所示。

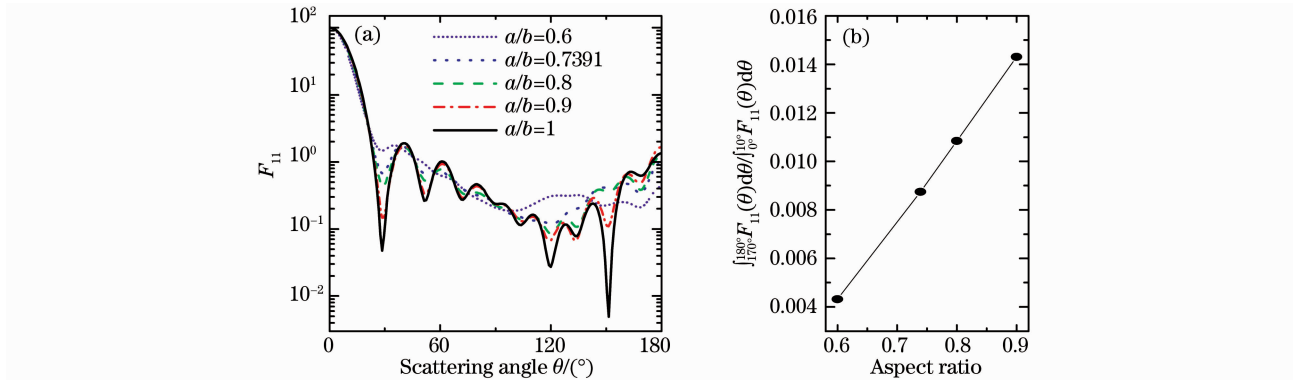


图 1 (a) 等消光截面、不同形状的单分散生物气溶胶颗粒的散射相函数, (b) $F_{11}(\theta)$ 在 170°~180° 的积分与 0°~10° 的积分的比值随纵横比分布

Fig. 1 (a) Scattering phase function for monodisperse biological aerosols with equal-extinction-cross-section and different shapes, (b) ratio of the integrated scattering at $170^\circ \sim 180^\circ$ to integrated scattering at $0^\circ \sim 10^\circ$ of $F_{11}(\theta)$ as a function of aspect ratio

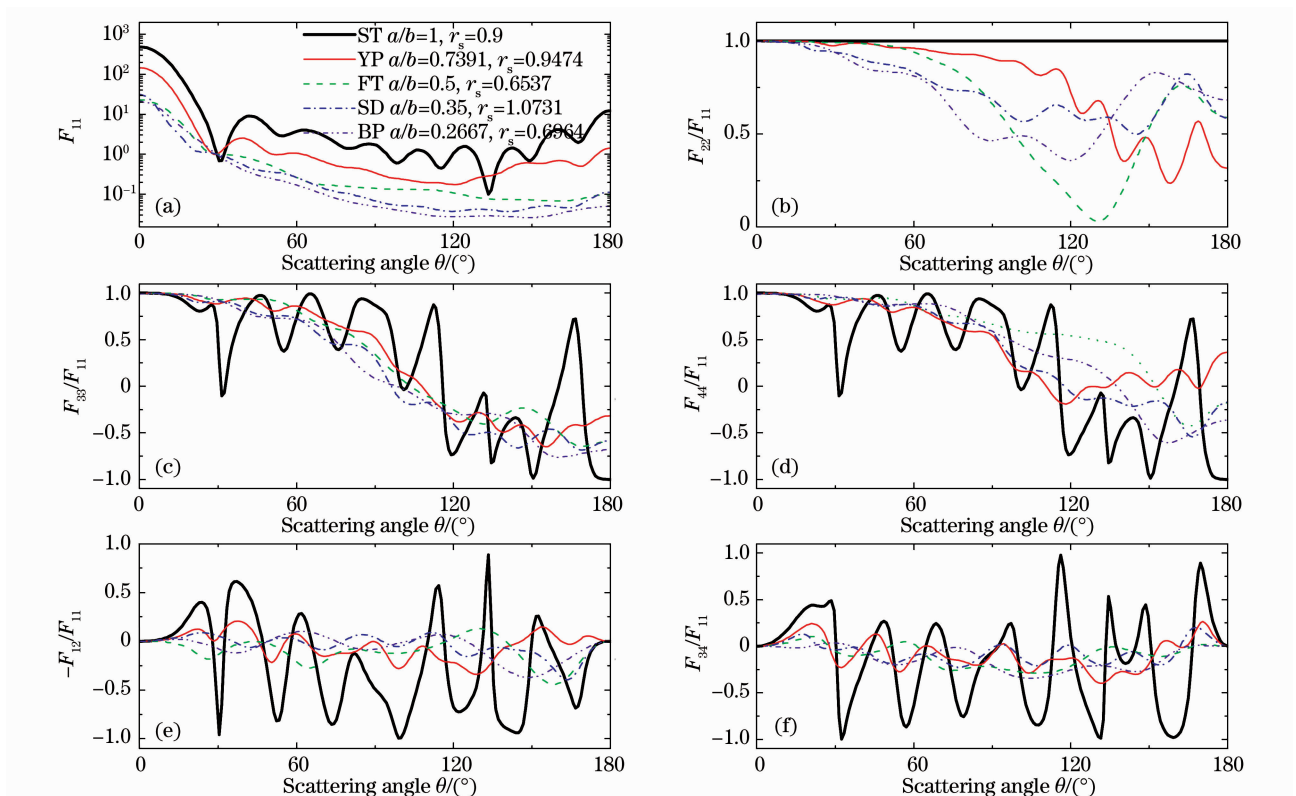


图 2 5 种单分散、随机取向生物气溶胶的散射矩阵元素分布曲线,其中 $F_{11}(\theta)$ 在 30° 处归一化

Fig. 2 Elements of the scattering matrix for five randomly oriented monodisperse biological aerosols. $F_{11}(\theta)$ is normalized to 1 at 30°

5 5 种生物战剂气溶胶颗粒散射矩阵元素的比较

用回转长椭球模型对 5 种单分散、随机取向的

生物战剂气溶胶进行模拟,得出的散射矩阵元素随散射角的变化曲线,如图 2 所示。

散射相函数 $F_{11}(\theta)$: 气溶胶颗粒群的前向散射

以衍射为主,当颗粒粒径增大时,散射光的分布趋向前方且集中在前向较小的角度范围内,使前向散射曲线变陡,图 3(a)为 $F_{11}(\theta)$ 曲线的前向散射斜率 $[F_{11}(0^\circ) - F_{11}(5^\circ)]/5$ 随颗粒等表面积球半径的变化曲线,可以看出颗粒等效半径越大,前向散射曲线越陡。散射相函数是粒径和粒形的函数,用傅里叶透镜接收颗粒的前向散射光并在焦平面上放置一个多元光电探测器,即可获得颗粒粒径大小及分布的信息,这是衍射散射式激光测粒法的理论基础。随

着纵横比的减小,非球形气溶胶颗粒的振荡变得平缓,其后向散射拾升逐渐增大。后向散射与前向散射的比值也反映了粒形的不同, $F_{11}(\theta)$ 在 $170^\circ \sim 180^\circ$ 范围内的积分与在 $0^\circ \sim 10^\circ$ 范围内的积分的比值随着纵横比的增大而增大,如图 3(b)所示,这与 4 节讨论的消光截面相等而形状不同的颗粒的散射特性一致。因此,通过探测后向散射与前向散射的光强而计算出两者的比值,可判断颗粒的形状。

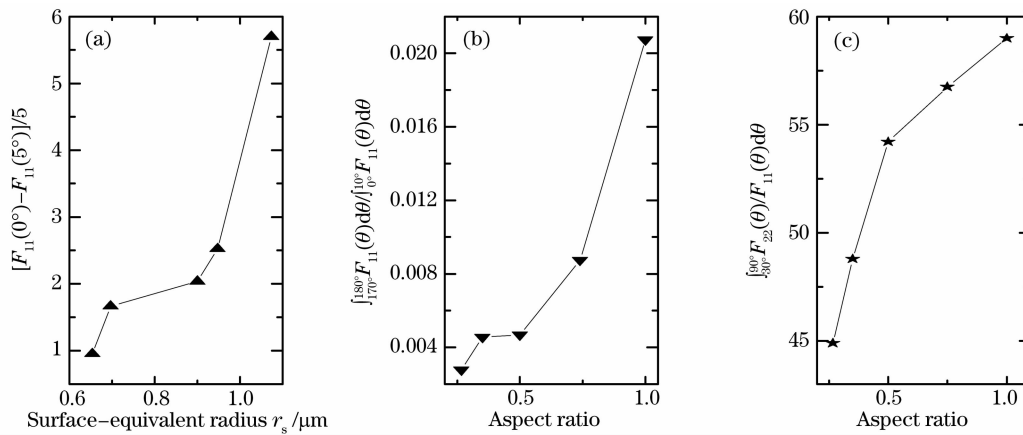


图 3 (a) 不同尺寸的生物气溶胶颗粒散射曲线的前向散射斜率 $[F_{11}(0^\circ) - F_{11}(5^\circ)]/5$ 随等表面积球半径的分布, (b) $F_{11}(\theta)$ 在 $170^\circ \sim 180^\circ$ 内的积分与 $0^\circ \sim 10^\circ$ 内的积分的比值随纵横比的分布, (c) $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 的积分随纵横比的分布

Fig. 3 (a) Forward-scattering steepness $[F_{11}(0^\circ) - F_{11}(5^\circ)]/5$ of $F_{11}(\theta)$ as a function of surface-equivalent radius for different aerosol particle sizes, (b) ratio of integrated scattering at $170^\circ \sim 180^\circ$ to integrated scattering at $0^\circ \sim 10^\circ$ of $F_{11}(\theta)$ as a function of aspect ratio, (c) integrated scattering at $30^\circ \sim 90^\circ$ of $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$ as a function of aspect ratio

$F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$: 对于纵横比为 1 的球形颗粒, $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta) = 1$; 对于非球形颗粒, 该比值小于 1, 其振荡幅度随着纵横比的减小而减小, 在 $120^\circ \sim 160^\circ$ 达到最小值, 且尺寸参数越大振荡越复杂。该最小值的位置随着纵横比的减小而向小散射角方向偏移。散射角小于 30° 的前向散射区, $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 接近于 1, 颗粒尺寸和形状对该比值的影响很小; 在侧向散射区, $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 内的积分随着纵横比的增大而增大, 如图 3(c) 所示。通过波片与偏振片等光学器件的组合^[7,11] 测量 $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 在该区域内的积分值, 可以判断其颗粒的形状, 用于粒形分析。 $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 在 170° 左右的后向散射区有一个最大峰值, 且其位置随着纵横比的减小而向大散射角方向偏移; 在后向散射区, $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 随着纵横比的减小而增大。

$F_{33}(\theta)/F_{11}(\theta)$, $F_{44}(\theta)/F_{11}(\theta)$: 对于球形颗粒, $F_{33}(\theta)/F_{11}(\theta) = F_{44}(\theta)/F_{11}(\theta)$, 其振荡随着散射角

的增大而下降, 对于非球形颗粒, 在大部分散射角处, $F_{44}(\theta)/F_{11}(\theta) > F_{33}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 。

$-F_{12}(\theta)/F_{11}(\theta)$: 微小颗粒光散射包含光强、偏振与相位信息, 而偏振信息是除了散射光强弱外较易获取与利用的重要散射信息。气溶胶颗粒的偏振规律十分复杂, 最明显的特征是偏振度随着散射角的增大而在正负之间振荡且负偏振大于正偏振。随着纵横比的减小, 振荡幅度迅速下降, 使总的偏振特性变得不太明显, 其振荡频率随着粒径的减小而减小。前向和近前向散射区偏振度变化不大; 随着散射角的增大, 球形与非球形颗粒的偏振度差别较明显; 在 $150^\circ \sim 170^\circ$ 之间, 偏振极小值的位置随着颗粒尺寸与形状的变化而变化, 对于尺寸相当的颗粒, 随着纵横比的减小, 偏振极小值位置向小散射角方向偏移。

$F_{34}(\theta)/F_{11}(\theta)$: 该比值的最大特征为, 随着纵横比的减小, 振荡幅度减小, 且其最小值向小散射角方向偏移。前向散射区的变化不太明显, 表明在小

角度散射时,可以用球形颗粒模拟非球形颗粒的散射。而在侧向和后向散射区,该比值随着纵横比的减小而变得敏锐,球形与非球形之间的差别变得明显,因此必须考虑颗粒形状的影响。

可见,通过测量颗粒的前向散射光强度可以判定颗粒的光学等效粒径,通过分析后向散射与前向散射的强度之比可以获得颗粒形状的信息。

6 结 论

基于回转长椭球模型与球形模型,采用 T 矩阵法,针对单分散生物战剂气溶胶颗粒,在随机取向条件下,讨论了非球形气溶胶颗粒的形状对散射相函数的影响,计算了 5 种气溶胶颗粒群 Stokes 散射矩阵中各元素的角度分布曲线,分析了光散射特征。椭球形气溶胶颗粒与球形气溶胶颗粒的散射特性具有明显的差别,曲线的变化不仅依赖于颗粒的尺寸,更依赖于颗粒的形状。具体结论如下:1) 对于消光截面相等但形状不同的颗粒,纵横比对散射相函数在 $0^\circ\sim 20^\circ$ 的前向散射区的影响很不明显,表明在前向小角度散射时,可以用球形颗粒模拟非球形颗粒的散射;在 $80^\circ\sim 100^\circ$ 的侧向区的散射特性与前向相同;而在后向散射区,散射相函数随着纵横比的变化而变得敏锐,且对于非球形气溶胶颗粒, $F_{11}(\theta)$ 在 $170^\circ\sim 180^\circ$ 范围内的积分与在 $0^\circ\sim 10^\circ$ 范围内的积分的比值随着纵横比的增大而增大,该参数可以表征颗粒形状;2) 对于不同尺寸和形状的生物气溶胶颗粒,颗粒粒径越大, $F_{11}(\theta)$ 曲线的前向散射斜率 $[F_{11}(0^\circ) - F_{11}(5^\circ)]/5$ 越大,可以表征颗粒尺寸; $F_{11}(\theta)$ 在 $170^\circ\sim 180^\circ$ 范围内的积分与在 $0^\circ\sim 10^\circ$ 范围内的积分的比值随着纵横比的增大而增大,反应了颗粒的形状,因此,通过分析后向散射与前向散射的强度之比可以获得颗粒形状的信息。3) 对于不同尺寸和形状的生物气溶胶颗粒, $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 在 $30^\circ\sim 90^\circ$ 内的积分随着纵横比的增大而增大,也可用以判断颗粒的形状。

在其他条件不变的前提下,特定尺寸和形状的气溶胶颗粒的散射特性唯一确定,根据所探测的散射矩阵元素的值,能够反演其尺寸和形状。散射数据库的建立以及对散射数据更深入的分析有助于粒度和粒形的反演。实验的设计以及结果的验证也是一个复杂而艰巨的过程,这一点将在以后的文章中给出。

研究结果为基于光散射原理的粒径及粒形测量仪器的设计提供了指导;在生物气溶胶监测领域,在

以本征荧光探测方法区分生物粒子与非生物粒子的基础上,结合光散射式粒径和粒形测量技术可快速准确地鉴别空气中所含生物粒子的种类,使生物气溶胶的准实时甚至实时检测、识别、确认和疫情性质判断成为可能。

参 考 文 献

- 1 J. R. Lakowicz, B. R. Masters. Principles of fluorescence spectroscopy [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2008, **13**: 029901
- 2 R. G. Pinnick, S. C. Hill, P. Nachman *et al.*. Fluorescence particle counter for detecting airborne bacteria and other biological particles [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1995, **23**(4):653~664
- 3 E. Hirst, P. H. Kaye, J. R. Guppy. Light scattering from nonspherical airborne particles; experimental and theoretical comparisons [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(30):7180~7186
- 4 P. H. Kaye, J. E. Barton, E. Hirst *et al.*. Simultaneous light scattering and intrinsic fluorescence measurement for the classification of airborne particles [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(21):3738~3745
- 5 T. Nousiainen, K. Vermeulen. Comparison of measured single-scattering matrix of feldspar particles with T-matrix simulations using spheroids [J]. *J. Quant. Spectrosc. Rad. Trans.*, 2003, **79-80**:1031~1042
- 6 H. Volten, O. Munoz, J. W. Hovenier *et al.*. WWW scattering matrix database for small mineral particles at 441.6 and 632.8 nm [J]. *J. Quant. Spectrosc. Rad. Trans.*, 2005, **90**(2):191~206
- 7 O. Munoz, H. Volten, J. F. de Haan *et al.*. Experimental determination of scattering matrices of olivine and Allende meteorite particles [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2000, **360**(2):777~788
- 8 M. I. Mishchenko, L. D. Travis, D. W. Mackowski. T-matrix computations of light scattering by nonspherical particles: A review [J]. *J. Quant. Spectrosc. Rad. Trans.*, 1996, **55**(5):535~575
- 9 Shao Shiyong, Huang Yinbo, Wei Heli *et al.*. Phase function of prolate spheroidal mono-disperse aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1):108~113
邵士勇, 黄印博, 魏合理等. 单分散长椭球形气溶胶粒子的散射相函数研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1):108~113
- 10 M. I. Mishchenko, J. W. Hovenier, L. D. Travis. Light Scattering by Nonspherical Particles: Theory, Measurements, and Applications [M]. London: Academic Press, 2000
- 11 M. I. Mishchenko, J. W. Hovenier, D. W. Mackowski. Single scattering by a small volume element [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, **21**(1):71~87
- 12 H. Volten, J. F. de Haan, J. W. Hovenier *et al.*. Laboratory measurements of angular distributions of light scattered by phytoplankton and silt [J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, **43**(6):1180~1197
- 13 A. Macke, M. I. Mishchenko. Applicability of regular particle shapes in light scattering calculations for atmospheric ice particles [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(21):4291~4296
- 14 L. D. Rotz, A. S. Khan, S. R. Lillibridge *et al.*. Public health assessment of potential biological terrorism agents [J]. *Emerging Infectious Diseases*, 2002, **8**(2):225~230
- 15 L. Szinicz. History of chemical and biological warfare agents [J]. *Toxicology*, 2005, **214**(3):167~181
- 16 Du Xin'an, Cao Wuchun. Response and Management of

- Bioterrorism[M]. Beijing: People's Military Medical Press, 2005
- 杜新安, 曹务春. 生物恐怖的应对与处置[M]. 北京: 人民军医出版社, 2005
- 17 P. S. Tuminello, E. T. Arakawa, B. N. Khare *et al.*. Optical properties of *Bacillus subtilis* spores from 0.2 to 2.5 μm [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(13):2818~2824
- 18 K. F. A. Ross, E. V. E. Billing. The water and solid content of living bacterial spores and vegetative cells as indicated by refractive index measurements [J]. *Journal of General Microbiology*, 1957, **16**(2):418~425
- 19 P. Foladori, A. Quaranta, G. Ziglio. Use of silica microspheres having refractive index similar to bacteria for conversion of flow cytometric forward light scatter into biovolume [J]. *Water Research*, 2008, **42**(14):3757~3766
- 20 A. Katz, A. Alimova, M. Xu *et al.*. In situ determination of refractive index and size of *Bacillus* spores by light transmission [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(6):589~591
- 21 M. A. Velazco-Roa, E. Dzhongova, S. N. Thennadil. Complex refractive index of nonspherical particles in the visible near infrared region—application to *Bacillus subtilis* spores [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(33):6183~6189
- 22 O. Munoz, H. Volten, J. F. de Haan *et al.*. Experimental determination of scattering matrices of randomly oriented fly ash and clay particles at 442 and 633 nm [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(D19):22833~22844
- 23 P. J. Wyatt. Differential light scattering; a physical method for identifying living bacterial cells [J]. *Appl. Opt.*, 1968, **7**(10):1879~1896
- 24 Liang Chunlei, Huang Huijie, Ren Bingqiang *et al.*. Study of miniature optical sensor for laser particle counter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9):1260~1264
- 梁春雷, 黄惠杰, 任冰强 等. 激光尘埃粒子计数器微型光学传感器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9):1260~1264
- 25 Huang Huijie, Zhao Yongkai, Ren Bingqiang *et al.*. Aerosol particle measurement by laser diode light scattering [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(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, **A29**(12):1117~1121