

# 颗粒散射光能分布的反常移动及其对粒度分析的影响

葛宝臻<sup>1,2</sup> 潘林超<sup>1,2</sup> 张福根<sup>3</sup> 魏耀林<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; <sup>2</sup> 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

<sup>3</sup> 珠海欧美克仪器有限公司, 广东 珠海 519085

**摘要** 基于米氏散射原理的激光粒度仪是颗粒测量领域应用最广泛的仪器之一。通常情况下颗粒越小, 散射角越大, 激光粒度仪探测器阵列接收到的散射光能分布的主峰位置越靠外。但是, 对特定相对折射率的颗粒, 在某些粒径区间, 散射光能分布的主峰位置会随着颗粒粒径的减小而向探测器阵列的内侧移动, 称之为散射光能分布的反常移动。根据米氏散射原理, 给出了反常移动的规律以及不同相对折射率下反常移动的粒径区间, 分析了反常移动对粒度分析的影响, 提出了降低该影响的方法, 并对实际样品进行测试对比。结果表明, 该方法可以降低反常移动对粒度分析的影响。

**关键词** 散射; 激光粒度仪; 光能分布反常移动; 米氏散射; 主峰位置

中图分类号 O436.2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0629001

## Abnormal Moving of Scattered Energy Distribution and Its Effect on Particle Size Analysis

Ge Baozhen<sup>1,2</sup> Pan Linchao<sup>1,2</sup> Zhang Fugen<sup>3</sup> Wei Yaolin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology of Ministry of Education, Tianjin 300072, China

<sup>3</sup> Zhuhai OMEC Instruments Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519085, China

**Abstract** Laser particle sizer which based on Mie scattering theory is one of the most widely used instruments in particle size measurement. Generally the smaller the particles are, the bigger the scattering angle is. The main peak position of Mie scattered energy distribution received by the detector array moves outward. However, for some particles of relative index of refraction in certain size ranges, the main peak position of scattered energy distribution moves toward the inside of the detector array as the particle size decreases, which can be called the abnormal moving of scattered energy distribution. Based on Mie scattering theory, the patterns of such abnormal moving and abnormal particle size interval of different relative indexes of refraction are obtained, the effect on particle size analysis is analysed, a method to reduce the effect is proposed. An actual sample is measured and compared. The results show that this method can reduce the effect of abnormal moving on particle size analysis.

**Key words** scattering; laser particle sizer; abnormal moving of energy distribution; Mie scattering; main peak position

**OCIS codes** 290.4020; 290.5820; 290.5825; 290.5850

## 1 引言

激光粒度仪是测量粒度分布的仪器, 其原理是通过测量颗粒对光的静态散射来测量粒度分布。仪器一般采用光电探测器阵列测量散射光的角度分布, 称为“散射光能分布”。光电探测器阵列由一系列同心

圆环组成, 每个环都是独立的探测单元, 其接收面积随散射角的增大而呈指数增大趋势, 因此尽管散射光的强度分布的最大值处在探测器阵列的圆心, 然后向边缘振荡减弱, 但探测器测得的光能分布的第一个峰(以下称为“主峰”)却会处在中心和边缘之间的某个

收稿日期: 2013-01-05; 收到修改稿日期: 2013-01-31

基金项目: 国家自然科学基金(60527002)资助课题。

作者简介: 葛宝臻(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事粒度检测和三维数字化技术等方面的研究。

E-mail: gebz@tju.edu.cn

单元上<sup>[1]</sup>。当颗粒粒径变小时,光能分布的主峰会向探测器外侧移动,反之,则向内侧移动,这是激光粒度仪测量颗粒大小的物理依据<sup>[2]</sup>。本文在研究中发现一种反常的现象:对于某些特定折射率的粒径区间,随着粒径的变小,光能分布的主峰向探测器内侧移动。通过对这种反常移动现象及其对粒度分析的影响进行研究,提出了一种降低该影响的方法,并通过实际样品测量对该方法进行了验证。

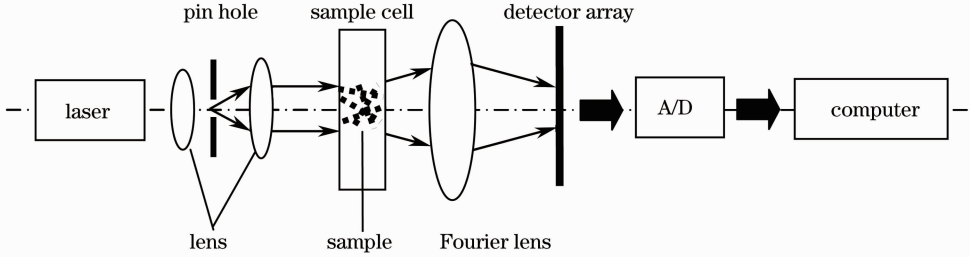


图 1 激光粒度仪原理图  
Fig. 1 Schematic diagram of laser particle sizer

根据米氏散射原理<sup>[3~6]</sup>,当一束强度为  $I_0$  的非偏振光入射到粒径为  $d$  的各向同性的球形颗粒时,其散射光强可以表示为

$$I = \frac{\lambda^2 I_0}{8\pi^2 r^2} [i_1(\theta, \alpha, m) + i_2(\theta, \alpha, m)], \quad (1)$$

式中  $I_0$  为入射光强度,  $r$  为颗粒到观察点的距离,  $\lambda$  为光波长 ( $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ ),  $i_1(\theta, \alpha, m)$  和  $i_2(\theta, \alpha, m)$  为散射光强函数,其数值计算可通过计算机完成<sup>[7]</sup>,  $\theta$  为散射角,  $m$  为颗粒与分散介质的相对折射率 ( $m = m_1/m_2$ , 以水为分散介质即  $m_2 = 1.33$ ),  $\alpha$  为无因次参量 ( $\alpha = m_2 \pi d / \lambda$ )。根据(1)式,面积为  $\Delta s_n$  的探测单元接收到的光能值为

$$E_n = \iint_{\Delta s_n} I(\theta, \alpha, m) ds = I(\theta_n, \alpha, m) \Delta s_n, \quad (2)$$

式中  $\Delta s_n$  和  $\theta_n$  为第  $n$  个探测单元的面积和平均散射角。

激光粒度仪中,理想的设计是  $\Delta s_n$  和  $\theta_n$  从内到外呈指数规律增长,即

$$\begin{cases} \Delta s_n = \Delta s_1 A^{n-1} \\ \theta_n = \theta_1 B^{n-1} \end{cases}, \quad (3)$$

根据(3)式,(2)式可以改写为

$$E_n = CI(\theta_n, \alpha, m) \theta_n^{\log_B A}, \quad (4)$$

式中  $C = \Delta s_1 / \theta_1 \log_B A$ ,  $A, B$  为常量,  $A \in (1, 1.3)$ ,  $B \in (1, 1.3)$ 。根据(4)式可以求出散射光能  $E_n$  随着平均散射角  $\theta_n$  的变化,即散射光能分布。

假设  $A = 1.20130, B = 1.10000, m = 1.1$ ,

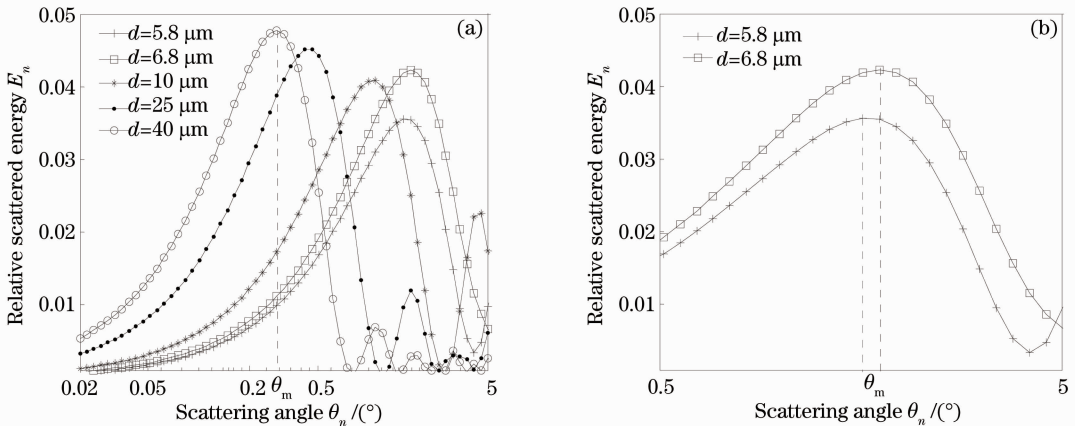


图 2 散射光能分布 ( $m = 1.1, m_1 = 1.463, m_2 = 1.33$ )

Fig. 2 Scattered energy distribution ( $m = 1.1, m_1 = 1.463, m_2 = 1.33$ )

$m_1 = 1.463, m_2 = 1.33$ , 根据(4)式模拟出  $d$  分别为 5.8、6.8、10、25、40  $\mu\text{m}$  的光能曲线, 如图 2(a) 所示, 每条曲线的主峰包含了粒径大小的主要信息, 其对应的散射角记为  $\theta_m$ 。可以看出, 一般情况下, 粒径越小, 散射光能的主峰对应的散射角  $\theta_m$  越大。但是, 对  $d = 5.8 \mu\text{m}, d = 6.8 \mu\text{m}$  的散射光能曲线进行局部放大, 如图 2(b) 所示,  $d = 5.8 \mu\text{m}$  主峰对应的散射角小于  $d = 6.8 \mu\text{m}$  对应的散射角, 粒径变小, 散射光能分布主峰向内移动, 违反了通常的颗粒光散射规律。

### 3 散射光能分布反常移动规律

#### 3.1 反常区间的定义

为了找出散射光能分布反常移动的规律, 假设  $B \rightarrow 1, n \rightarrow \infty$ , 那么  $E_n$  变为  $\theta_n$  的连续函数。  $E_n$  和  $\theta_n$  可记为  $E$  和  $\theta$ , (4)式变为

$$E = CI(\theta, \alpha, m)\theta^{\log_B A}, \quad (5)$$

令

$$\frac{dE}{d\theta} = C\theta^{\log_B A - 1} \left[ \frac{dI(\theta, \alpha, m)}{d\theta} \theta + I(\theta, \alpha, m) \log_B A \right] = 0, \quad (6)$$

根据(6)式可求得任一粒径  $d$  对应的光能分布主峰位置  $\theta_m$ , 如此可得到一条  $\theta_m - d$  曲线, 如图 3 所示, 其中  $A = 1.00019, B = 1.00010, m = 1.1, m_1 = 1.463, m_2 = 1.33$ 。在  $(d_1, d_2)$  区间,  $\theta_m - d$  曲线出现凹凸, 多个粒径对应相同的峰值位置  $\theta_m$ , 因此把  $(d_1, d_2)$  定义为反常区间。

常数  $A$  与  $B$  的值会影响  $\theta_m$  的大小, 但并不影响反常区间的出现规律。如图 4 所示,  $m = 1.1, m_1 = 1.463, m_2 = 1.33, G = \log_B A$  分别为 1.0、1.5、2.0、2.5 时的  $\theta_m - d$  曲线, 可以看到,  $G$  取不同值时, 同一个  $d$  对应的  $\theta_m$  不同, 但是曲线出现凹凸的位置是一致的, 即反常区间出现的位置不变。

表 1 不同相对折射率对应的反常区间 ( $m_2 = 1.33$ )

Table 1 Abnormal interval of different relative refractive indexes of refraction ( $m_2 = 1.33$ )

$m$	Abnormal interval / $\mu\text{m}$	Interval length / $\mu\text{m}$
1.05	11.14~14.99; 20.99~24.60...	3.73
1.1	5.35~7.35; 10.50~12.55; 15.60~17.62...	2.02
1.2	2.73~3.82; 5.15~6.40; 7.65~8.78...	1.16
1.3	1.77~2.62; 3.33~4.13; 5.05~5.80...	0.80
1.4	1.31~1.95; 2.57~3.20; 3.75~4.48...	0.67
1.5	1.01~1.57; 2.03~2.62; 3.01~3.53...	0.56
1.6	0.85~1.45; 1.66~2.11; 2.52~3.01...	0.51
1.7	0.72~1.19; 1.45~1.95; 2.11~2.57...	0.48
1.8	0.61~1.08; 1.21~1.63; 1.84~2.24...	0.43
1.9	0.54~0.88; 1.08~1.45; 1.60~2.07...	0.39
2.0	0.49~0.80; 0.98~1.37; 1.48~1.77...	0.33

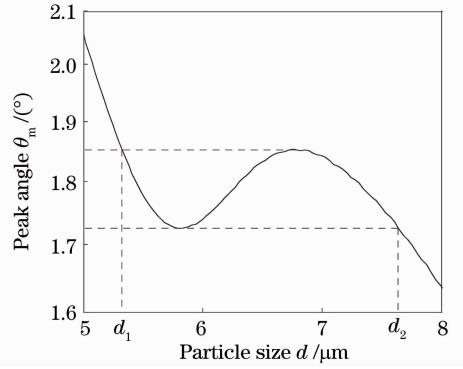


图 3 反常区间的定义

Fig. 3 Definition of abnormal interval

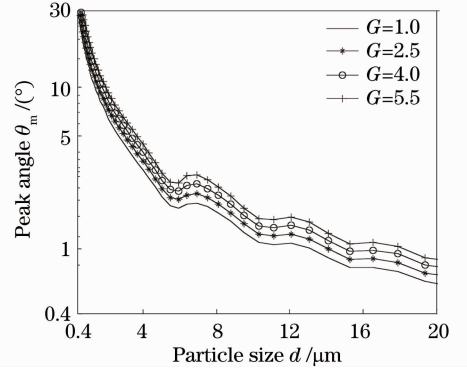


图 4  $G$  取不同值时,  $\theta_m - d$  曲线 ( $m = 1.1, m_1 = 1.463, m_2 = 1.33$ )

Fig. 4 Relation of  $\theta_m$  and  $d$  with different  $G$  ( $m = 1.1, m_1 = 1.463, m_2 = 1.33$ )

#### 3.2 非吸收颗粒的反常区间

反常区间与  $A, B$  的取值无关, 不妨取  $A = 1.00019, B = 1.00010$ , 粒径范围  $d \in (0.4 \mu\text{m}, 20 \mu\text{m})$ 。图 5 给出了  $m = 1.1, m_1 = 1.463, m_2 = 1.33$  和  $m = 1.5, m_1 = 1.463, m_2 = 1.33$  的非吸收颗粒的  $\theta_m - d$  曲线。根据 3.1 节中反常区间的定义, 可以得到不同相对折射率  $m$  ( $m_2 = 1.33$ ) 对应的反常区间, 如表 1 所示。

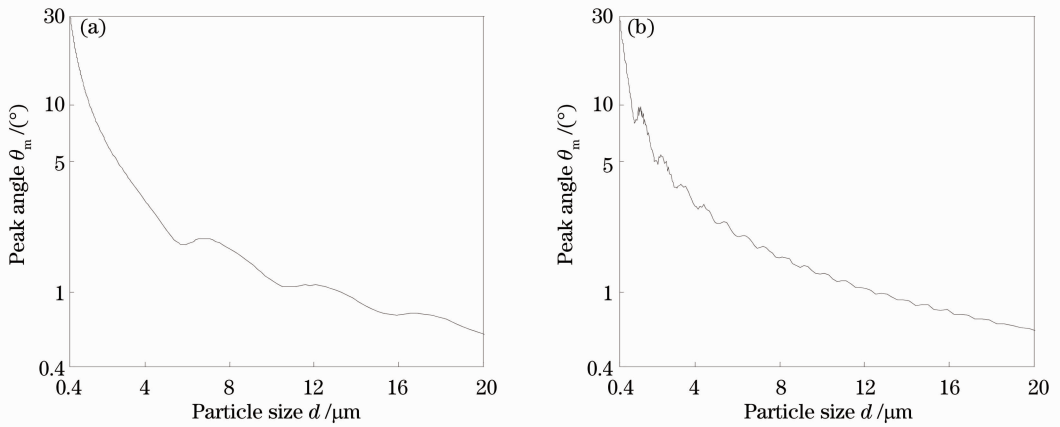


图 5 散射光能主峰位置  $\theta_m$  随粒径  $d$  的变化。(a)  $m=1.1, m_1=1.463, m_2=1.33$ ; (b)  $m=1.5, m_1=1.463, m_2=1.33$

Fig. 5 Relation of  $\theta_m$  and  $d$ . (a)  $m=1.1, m_1=1.463, m_2=1.33$ ; (b)  $m=1.5, m_1=1.463, m_2=1.33$

由图 5 和表 1 可以总结出如下规律:

- 1) 总体上, 随着  $d$  的增大,  $\theta_m$  逐渐变小, 符合通常认为的散射规律。
- 2)  $\theta_m-d$  曲线不是单调下降, 而是呈波浪式振荡下降趋势。
- 3) 在相同的  $m$  下, 不同反常区间的区间长度基本相同。
- 4) 随着  $m$  的增大, 反常区间长度变短; 第一个反常区间的位置向小粒径方向移动。

### 3.3 颗粒的吸收特性对散射光能峰值 $\theta_m$ 的影响

当颗粒对光有吸收时, 用折射率  $m = m' - m''i$  表示,  $m''$  表示颗粒的吸收特性,  $m''$  越大, 颗粒对光的吸收越强, 对光无吸收的颗粒  $m'' = 0$ <sup>[8]</sup>。

图 6 给出了两种吸收性颗粒的  $\theta_m-d$  曲线, 对应的  $m$  分别为  $1.5-0.01i, 1.5-0.05i$ 。可以看出, 折射率虚部变大, 反常区间变小, 直至消失。表 2 给出了使得反常区间消失  $m'$  对应的  $m''$  的临界值,  $m'$  越大, 使得反常区间消失对应的  $m''$  的临界值也越大。

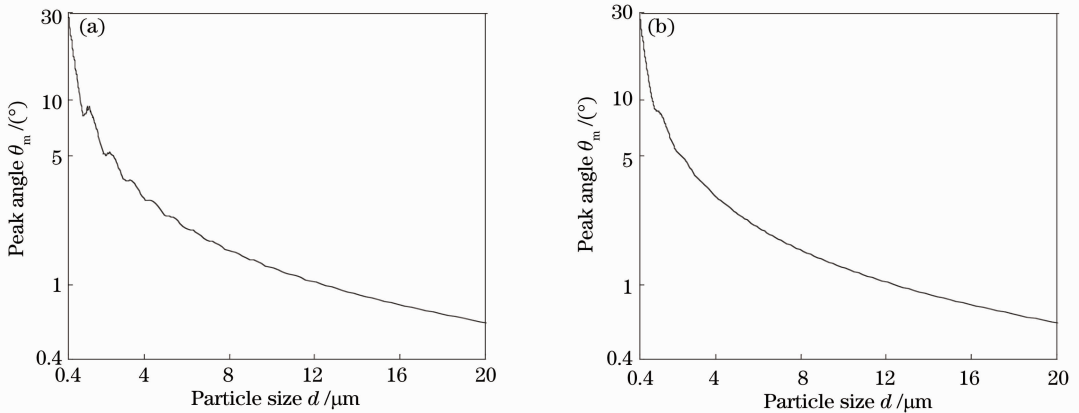


图 6 散射光能主峰位置  $\theta_m$  随粒径  $d$  的变化。(a)  $m=1.5-0.01i, m_2=1.33$ ; (b)  $m=1.5-0.05i, m_2=1.33$

Fig. 6 Relation of  $\theta_m$  and  $d$ . (a)  $m=1.5-0.01i, m_2=1.33$ ; (b)  $m=1.5-0.05i, m_2=1.33$

表 2 当反常区间消失时,  $m'$  对应的  $m''$  ( $m_2=1.33$ )

Table 2 Matching of  $m'$  and  $m''$  when abnormal interval disappears ( $m_2=1.33$ )

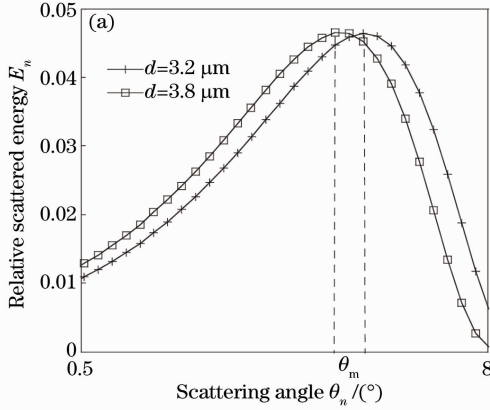
$m'$	1.05	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
$m''$	0.003	0.005	0.008	0.015	0.02	0.035	0.045	0.05	0.065	0.08	0.09

### 3.4 颗粒散射光能峰值反常移动的物理解释

早期的激光粒度仪是建立在夫琅禾费衍射理论基础上的, 这是一种近似理论, 只适用于被测颗粒尺寸远大于光波波长的情况。为了满足亚微米颗粒精确测量的要求, 逐步采用建立在严格麦克斯韦方程

基础上的米氏散射理论。从几何光学的角度看, 米氏散射是夫琅禾费衍射、反射、折射三部分光的相干叠加<sup>[9]</sup>。根据夫琅禾费理论, 粒径  $d$  越大, 光能分布的主峰对应的散射角  $\theta_m$  越小, 这是对于散射光能主峰移动规律的通常认识, 而事实上折射和反射对

散射光场有一定的贡献,折射光只与相对折射率有关,而与粒径无关<sup>[9]</sup>。对于对光吸收比较强的颗粒比如煤粉,其相对折射率  $m = 1.18 - 0.75i$  ( $m_1 = 1.57 - i, m_2 = 1.33$ )<sup>[1]</sup>,由于煤粉颗粒为黑色,散射光中折射光被颗粒吸收,  $d = 3.2 \mu\text{m}$  与  $d = 3.8 \mu\text{m}$



的光能分布主峰移动正常,如图 7(a)所示;如果假设散射光中折射光没有被吸收,即把相对折射率虚部置为 0,  $d = 3.2 \mu\text{m}$  与  $d = 3.8 \mu\text{m}$  的光能分布主峰出现了反常移动,如图 7(b)所示。

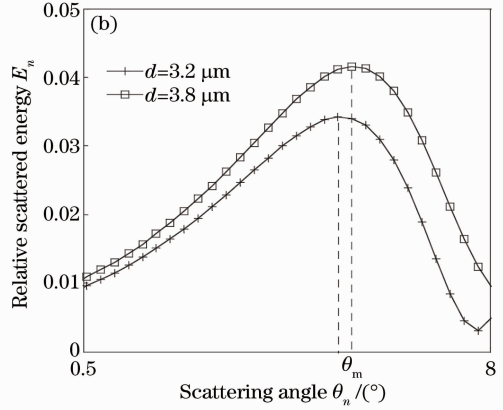


图 7 折射光对光能主峰的影响。(a)  $m = 1.18 - 0.75i, m_1 = 1.57 - i, m_2 = 1.33$ ; (b)  $m = 1.18, m_1 = 1.57, m_2 = 1.33$

Fig. 7 Effect of refracted light on scattered energy main peak. (a)  $m = 1.18 - 0.75i, m_1 = 1.57 - i, m_2 = 1.33$ ;

(b)  $m = 1.18, m_1 = 1.57, m_2 = 1.33$

因此对于颗粒的散射光来讲,折射和反射对散射光的贡献不容忽视,由煤粉的分析可以看到,由于折射光的作用造成了散射光能分布的主峰出现反常移动,因此折射光是造成出现反常移动的物理原因。

#### 4 散射光能分布反常移动对粒度分析的影响

一般情况下随着粒径增大,光能分布主峰向探测器内侧移动,因此光能分布的主峰位置与粒径值之间的对应是唯一的,这是激光粒度仪的理论基础。但是,反常现象打破了这种规律,这给粒度分析带来一定的影响。激光粒度测量中,求解粒度分布可以通过解线性方程组

$$\mathbf{M}\mathbf{W} = \mathbf{E}, \quad (7)$$

求得。式中  $\mathbf{W} = [w_1, \dots, w_n]^T$  为粒度分布向量,  $\mathbf{E} = [e_1, \dots, e_n]^T$  为光能向量,  $\mathbf{M}$  是由单位重量的一系列代表粒径  $d_j$  ( $j = 1, 2, 3, \dots, n$ ) 的光能分布组成的  $n \times n$  矩阵,称为光能矩阵。

在基于米氏散射原理的激光粒度仪中,一般先选定仪器的粒径测量范围,然后按照等比的原则在测量范围内选取代表粒径。如果相邻两个代表粒径的散射光能峰值出现了反常移动,而被测样品的粒度分布又正好在这个区间附近,那么粒度的分析结果将出现较大误差。下面举例说明:某商品化的仪器,其测量范围为  $0.1 \sim 500 \mu\text{m}$ ,按照等比的原则选

取 32 个代表粒径  $d_1, d_2, \dots, d_{32}$ ,比例系数  $q = 1.3049$ ,表 3 列出了前 20 个代表粒径。对照表 1 可以发现,当  $m = 1.2$  ( $m_1 = 1.596, m_2 = 1.33$ ) 时,其中  $d_{13} = 2.7855 \mu\text{m}$  与  $d_{14} = 3.635 \mu\text{m}$  的散射光能峰值出现了反常移动。

为了研究反常区间对粒度分析的影响,预设了表 3 某商品化仪器的前 20 个代表粒径

Table 3 Former twenty representative diameters of a commercial instrument

Number	Representative diameter / $\mu\text{m}$
1	0.11423
2	0.14907
3	0.19453
4	0.25385
5	0.33126
6	0.43228
7	0.56410
8	0.73612
9	0.96059
10	1.2535
11	1.6358
12	2.1346
13	2.7855
14	3.6350
15	4.7435
16	6.1900
17	8.0776
18	10.541
19	13.755
20	17.950

2组符合 Rosin-Rammler(RR)分布<sup>[10]</sup>的理论粒度分布,RR分布参数分别为  $x=3.664\ \mu\text{m}$ ,  $k=8$  和  $x=3.955\ \mu\text{m}$ ,  $k=3$ 。然后计算出预设粒度分布的散射光能分布,使用 Chahine 反演算法对该散射光能分布进行粒度分析<sup>[11~13]</sup>。粒度分布曲线及特征

粒径分别如图 8 和表 4 所示,可以看到,对于给定的两组粒度分布,反演的粒度分布在  $d=2.7855\ \mu\text{m}$  与  $d=3.635\ \mu\text{m}$  的体积分布与理论值相比出现了较大的误差,导致了反演 D50 与理论值的相对偏差达到了  $-14.29\%$  与  $-11.43\%$ 。

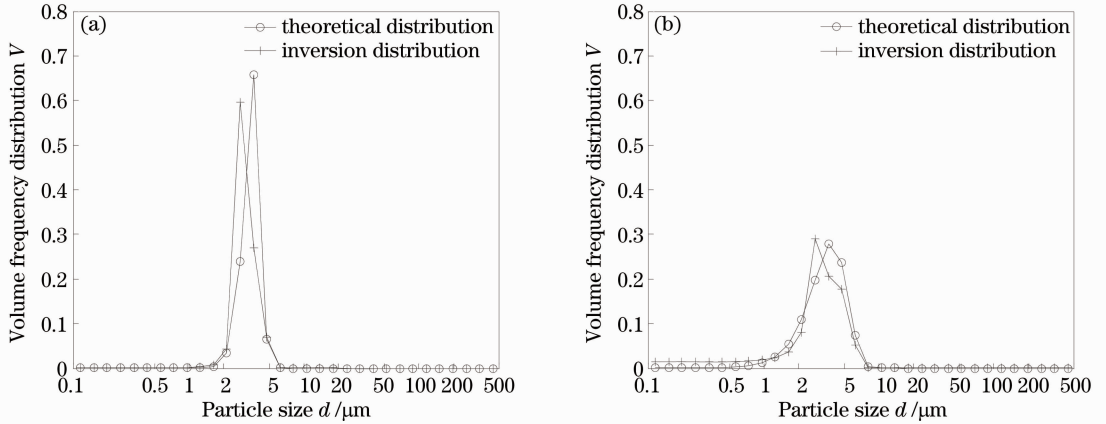


图 8 理论与反演粒度分布对比。(a) 1组; (b) 2组

Fig. 8 Comparison of theoretical distribution and inversion distribution. (a) Set 1; (b) set 2

表 4 理论与反演粒度分布对比

Table 4 Comparison of theoretical distribution and inversion distribution

	Set 1			Set 2		
	Theory / $\mu\text{m}$	Inversion / $\mu\text{m}$	Relative error /%	Theory / $\mu\text{m}$	Inversion / $\mu\text{m}$	Relative error /%
D50	3.50	3.00	-14.29	3.50	3.10	-11.43
D10	2.61	2.47	-5.36	1.87	1.54	-17.65
D90	4.10	4.06	-0.98	5.28	5.28	0.00

### 5 降低反常移动对粒度分析影响的方法

由 3.3 节可知,随折射率虚部变大,反常区间变小,直至消失,因此当代表粒径  $d_j, d_{j+1}$  的光能分布主峰出现反常移动时,可以给相对折射率  $m$  取一个虚部使得  $d_j, d_{j+1}$  光能峰值能够正常移动,如图 9 所示,对于  $m=1.2$  的颗粒,当相对折射率虚部为  $0.003i$  时,反常区间会变小,此时代表粒径  $d=2.7855\ \mu\text{m}$  与  $d=3.6350\ \mu\text{m}$  的光能峰值的移动正常。因此在计算光能矩阵中  $d=2.7855\ \mu\text{m}$  与  $d=3.6350\ \mu\text{m}$  的光能分布时,取相对折射率  $m=1.2-0.003i$ ,对预设的两组粒度分布,重新进行反演粒度分析,如图 10 和表 5 所示,可以发现反演与理论的粒度分布相比, D50 的相对偏差小于  $2\%$ , D10 和 D90 的相对偏差小于  $6\%$ ,反演结果可以接受。因此对出现反常移动的代表粒径相对折射率加虚部的方法可以降低反常现象对粒度分析的影响。但是所加虚部应尽量小,使得  $d_j, d_{j+1}$  光能峰值能够正常移

动即可。一般原则是:从小(一般为  $0.001i$ )到大增加折射率虚部,每增加一次,检查一次光能分布是否正常,一旦正常,就停止增加虚部。如果所加虚部过大,会导致反演与理论粒度分布差别较大。

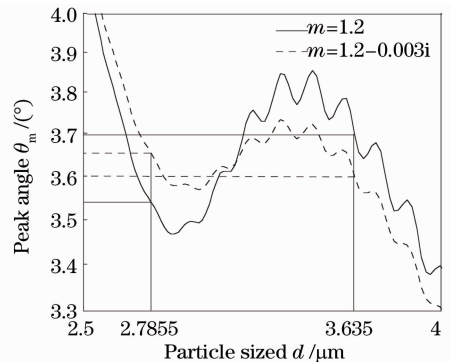


图 9 两种相对折射率下  $d=2.7855\ \mu\text{m}$  与  $d=3.6350\ \mu\text{m}$  的光能分布峰值对比

Fig. 9 Comparison of  $\theta_m$  of  $d=2.7855\ \mu\text{m}$  and  $d=3.6350\ \mu\text{m}$  with two relative refractive indexes

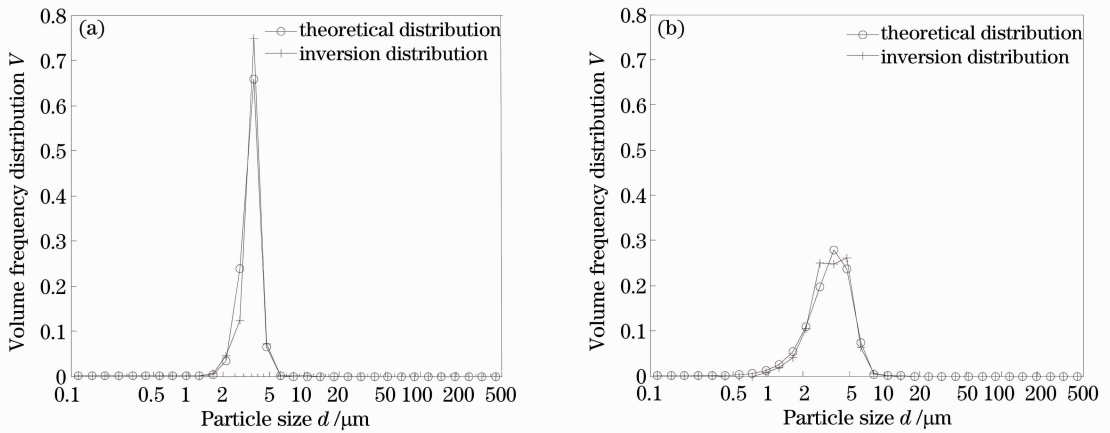


图 10 理论与反演粒度分布对比。(a) 1组；(b) 2组

Fig. 10 Comparison of theoretical distribution and inversion distribution. (a) Set 1; (b) set 2

表 5 理论与反演粒度分布对比

Table 5 Comparison of theoretical distribution and inversion distribution

	Set 1			Set 2		
	Theory / $\mu\text{m}$	Inversion / $\mu\text{m}$	Relative error /%	Theory / $\mu\text{m}$	Inversion / $\mu\text{m}$	Relative error /%
D50	3.50	3.56	1.71	3.50	3.45	-1.43
D10	2.61	2.61	0.00	1.87	1.97	5.35
D90	4.10	4.14	0.98	5.28	5.24	-0.75

## 6 实际样品测量验证

为了说明反常区间对粒度分析的影响以及对降低其影响的方法进行验证,使用 GBW(E)120022 的标准物质[标称 D50 的粒径为  $(3.1 \pm 0.2) \mu\text{m}$ ,  $m = 1.2$ ,  $m_1 = 1.596$ ,  $m_2 = 1.33$ ]在激光粒度仪上测试,使用  $m = 1.2$  的光能矩阵的反演结果如图 11 中 1 组曲线所示,反演 D10, D50, D90 的粒径分别为 1.84, 2.86, 3.88  $\mu\text{m}$ 。可以看到,反常移动造成激光粒度仪对该标准物质的 D50 测量相对误差为 -7.75%;使用  $d = 2.7855 \mu\text{m}$  与  $d = 3.635 \mu\text{m}$  加 0.003i 虚部的光能矩阵进行反演的粒度分析结果如图 11 中 2 组曲

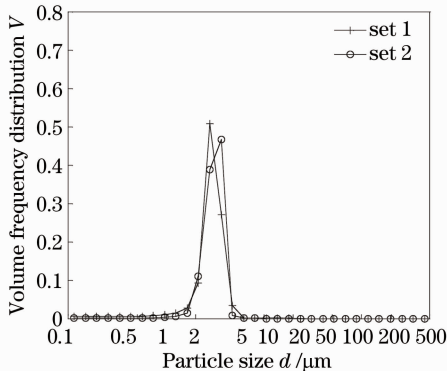


图 11 两种光能矩阵反演结果对比

Fig. 11 Comparison of two energy distribution matrix inversion results

线所示,反演 D10, D50, D90 的粒径分别为 2.20, 3.12, 3.93  $\mu\text{m}$ 。由此可见,使用加虚部的方法可以降低反常现象对粒度分析的影响。

## 7 结 论

通过对光能分布主峰位置的反常移动及其对粒度分析的影响分析,结果发现:1)对于特定相对折射率下的某些粒径区间,存在光能主峰位置的反常移动;2)当折射率虚部大于某一值时,反常移动现象消失;3)反常移动会造成粒度分析出现较大误差;4)对出现反常移动的代表粒径,对其相对折射率加一个较小虚部,能够降低反常区间对粒度分析的影响。

## 参 考 文 献

- 1 Cai Xiaoshu, Su Mingxu, Shen Jianqi *et al.*. Particle Size Measurement Techniques and Applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010
- 2 蔡小舒, 苏明旭, 沈建琪 等. 颗粒粒度测量技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010
- 3 Zhang Fugen. The optical structure of laser particle sizer [C]. 2006 Annual Conference of Chinese Society of Particology and Symposium on Particle Technology across Taiwan Straits, 2006. 19~23
- 4 张福根. 激光粒度仪的光学结构[C]. 中国颗粒学会 2006 年年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会论文集, 2006. 19~23
- 5 H. C. Van de Hulst. Light Scattering by Small Particles [M]. New York: Wiley, 1957

- 4 Wu Wei, Qin Shiqiao, Huang Zhuqing. A fast inversion method for water droplet size determination in scattering light measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0712008  
吴伟, 秦石桥, 黄竹青. 水滴粒径散射测量中的快速反演方法研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0712008
- 5 Li Yingle, Li Jin, Wang Mingjun *et al.*. Investigation of scattering for a uniformly anisotropic dielectric sphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0429002  
李应乐, 李瑾, 王明军等. 均匀各向异性介质球散射的解析研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(4): 0429002
- 6 Zhang Xiaolin, Huang Yinbo, Rao Ruizhong. Equivalence of light scattering by one internal-mixed model for aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0629001  
张小林, 黄印博, 饶瑞中. 一种内混合气溶胶粒子模型光散射的等效性[J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0629001
- 7 Shen Jianqi, Liu Lei. An improved algorithm of classical Mie scattering calculation [J]. *China Powder Science and Technology*, 2005, **11**(4): 1~5  
沈建琪, 刘蕾. 经典 Mie 散射的数值计算方法改进[J]. *中国粉体技术*, 2005, **11**(4): 1~5
- 8 Feng Mingchun, Gao Minguang, Xu Liang *et al.*. Measurement and analysis method of the complex refractive index on water-soluble aerosol by FTIR [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0401002  
冯明春, 高闰光, 徐亮等. 傅里叶变换红外光谱对水溶性气溶胶复折射率的测量分析方法研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(4): 0401002
- 9 Xu Feng, Cai Xiaoshu, Shen Jiaqi. Geometric approximation of light scattering in arbitrary diffraction regime for absorbing particles; application in laser particle sizing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1464~1469  
徐峰, 蔡小舒, 沈嘉祺. 米氏理论的近似及在粒度测量中的应用[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1464~1469
- 10 Chen Zhongwei, Liang Xingang, Xu Xianghua *et al.*. Approximate conversion between two conventional distribution functions for water spray [J]. *J. Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.)*, 2011, **51**(4): 467~470  
陈中伟, 梁新刚, 徐向华等. 雾状水幕 2 种常用分布函数的近似转换[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2011, **51**(4): 467~470
- 11 F. Ferri, G. Righini, E. Paganini. Inversion of low-angle elastic light-scattering data with a new method devised by modification of the Chahine algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(30): 7539~7550
- 12 Ge Baozhen, Wei Yongjie, Lü Qieni *et al.*. Study of invert particle size distribution by choosing convergence threshold based on distribution whdth [J]. *Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(11): 1329~1332  
葛宝臻, 魏永杰, 吕且妮. 基于分布宽度选取收敛阈值求解粒子尺寸分布[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(11): 1329~1332
- 13 Lü Qieni, Ge Baozhen, Chen Yiliang *et al.*. Particle sizing and size distribution measurement of alcohol spray by interferometric particle imaging [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0308003  
吕且妮, 葛宝臻, 陈益亮等. 激光干涉粒子成像乙醇喷雾场粒子尺寸和粒度分布测量[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0308003

栏目编辑: 李文喆