

消光光谱法颗粒测量技术中的病态性问题的研究

段天雄 沈建琪 胡彬 于海涛

上海理工大学理学院, 上海 200093

摘要 在可见光范围内,对消光光谱法颗粒测量技术中的病态性问题的研究,对目标函数的极值情况和反演计算结果进行了计算讨论,并对标准聚苯乙烯颗粒进行了实验测量和反演计算。模拟计算和实验结果表明,在消光光谱法测量中,亚微米级颗粒的病态性表现得尤为严重,目标函数极值情况和反演结果对误差非常敏感,反演结果的稳定性和准确度较差。为保证测量结果准确性,应尽可能减小测量误差。微米级颗粒对应的目标函数极值情况和反演计算结果则较为理想。

关键词 测量;颗粒测量;消光光谱法;病态性;目标函数;反演计算

中图分类号 O436; O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.091202

Study of Ill-Condition Problem in Particle Size Measurement Based on Spectral Extinction Technique

Duan Tianxiong Shen Jianqi Hu Bin Yu Haitao

College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract In the visible light region, the ill-condition problem in particle size measurement based on spectral extinction technique is analyzed. By analyzing the results of objective function and inversion results, the influence of the ill-condition problem on spectral extinction method is discussed. The experiments are performed with standard polystyrene particles and the particle size distribution is inverted. Both simulation and experimental results show that the ill-condition problem in spectral extinction measurement is serious for the submicron particles. The situation of objective function extremum and inversion results are sensitive to error, leading to the poor stability and accuracy of the inversion results. To ensure the accuracy of the particle size measurement, measurement error should be minimized. In contrast, the situation of objective function and inversion results for micron particles is much better than for submicron particles.

Key words measurement; particle measurement; spectral extinction method; ill-condition; objective function; inverse calculation

OCIS codes 120.6200; 290.4020; 290.5820; 290.5850; 300.6170

1 引言

在能源、食品、医药、化工等众多领域,颗粒粒径大小对产品的质量或性能起着极为关键的作用,在环境监测和一些工业产品制备中,需要对颗粒尺寸分布进行在线实时监测。近年,光学测量法以其独特的优势,得到了广泛的发展和应^[1-3]。其中,消光光谱法具有快速、装置简单等优点,能对亚微米和微米级颗粒系进行测量,并可以同时得到粒径分布和浓度,具有较大的发展空间和应用潜力^[4]。该方法在应用中的最大难点在于其病态性^[5],不可避免的测量误差导致颗粒粒径分布的反演结果产生明显的误差,这已成为消光光谱法在实际应用中的瓶颈。

对消光光谱法病态性问题的改善,主要包括两个方面:一是改善系数矩阵,譬如选择特定波长组合等^[6];

收稿日期: 2015-03-27; 收到修改稿日期: 2015-04-17; 网络出版日期: 2015-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(51476104)

作者简介: 段天雄(1989—),男,硕士研究生,主要从事光学颗粒测量技术方面的研究。E-mail: danytian312@yeah.net

导师简介: 沈建琪(1965—),男,博士,教授,主要从事光学颗粒测量技术方面的研究。

E-mail: jqshenk@163.com (通信联系人)

二是改进反演算法,从而得到更稳定准确的反演结果。目前,大部分研究工作集中在消光光谱法的应用研究^[7-10]和反演算法改进上^[11-14],有关消光光谱法的病态性特征的研究工作相对较少。譬如,消光光谱法反演计算目标函数的极值问题、目标函数极值区域的形态、目标函数对测量误差等因素的敏感性问题等,这些因素都会影响到算法的收敛性及最终的反演结果。

本文分析了消光光谱法颗粒测量技术中病态性问题的特征,在可见光范围内,通过考察分析目标函数的极值情况和反演计算结果,对消光光谱法中病态性问题的影响进行了讨论,并对标准聚苯乙烯颗粒进行了实验测量和反演计算。

2 测量原理

消光光谱法以光散射理论为基础,通过测量复合光(如白光)通过颗粒介质后的透射率光谱(或消光谱)反演计算颗粒粒度分布。

当一束强度为 I_0 、波长为 λ 的单色平行光通过含有均匀悬浮颗粒的介质时,由于颗粒对入射光的散射和吸收作用,透射光强 I 会发生一定程度的衰减,透射光强与入射光强的关系满足 Lambert-Beer 定律^[15]:

$$I = I_0 \exp(-\tau L), \quad (1)$$

式中 τ 为浊度, L 为颗粒介质的厚度。在实际测量中,被测量的颗粒大多不是单分散颗粒系,而是具有一定尺寸分布范围的多分散颗粒系。如果被测量颗粒是球形颗粒且满足不相关单散射,此时有

$$E(\lambda) = \frac{3L}{2} C_v \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \frac{K_{\text{ext}}(\lambda, m, D)}{D} f_v(D) dD, \quad (2)$$

式中 $E(\lambda) = -\ln T(\lambda)$ 为消光值, $T(\lambda) = I(\lambda)/I_0(\lambda)$ 是波长为 λ 的透射光强与入射光强之比(即透射率)。 C_v 为颗粒体积浓度, D_{\min} 和 D_{\max} 分别为待测颗粒系尺寸分布的下限和上限。 $K_{\text{ext}}(\lambda, m, D)$ 为消光系数,表征单颗粒对入射光的散射量和吸收量之和,是颗粒粒径 D 、波长 λ 及颗粒相对于周围介质的相对折射率 m 的函数,其精确值可由经典 Mie 理论计算得到。 $f_v(D)$ 是归一化颗粒体积频度分布,它是粒径测量中待求的未知量。在实际测量中,采用多波长测量法以获取颗粒系的粒径分布和浓度信息。用复合光(譬如白光)作为光源,采用光谱仪分两步探测入射光和透射光的信号以获得消光光谱[即 $E(\lambda) - \lambda$ 曲线],并由此通过反演计算得到颗粒粒径分布信息。

(2)式属于第一类 Fredholm 积分方程,通常先进行离散处理,然后采用数值方法求解:

$$E_i(\lambda_i) = C \cdot \sum_{j=1}^N \underbrace{\frac{K_{\text{ext}}(\lambda_i, m, D_j)}{D_j}}_{A_{ij}} \underbrace{f_v(D_j) \Delta D_j}_{X_j}. \quad (3)$$

取 M 个波长 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, M)$, E_i 为第 i 个波长的消光值;取 N 个颗粒粒径分档 $D_j (j=1, 2, \dots, N)$, $X_j = f_v(D_j) \Delta D_j$ 为第 j 个粒径分档区间内的颗粒体积百分比; A_{ij} 为系数矩阵元; $C = 1.5LC_v$ 为常数。(3)式也可表示为矩阵形式:

$$E = AX, \quad (4)$$

式中 A 为 $M \times N$ 矩阵, X 为 N 维列向量, E 为 M 维列向量。

3 消光光谱法中病态性问题及影响

(4)式所示的线性方程是病态的,其病态程度由系数矩阵决定。系数矩阵的特征主要取决于消光光谱法中的第一类 Fredholm 积分方程[(2)式]的核函数 K_{ext} (即消光系数)。图 1 所示为根据 Mie 理论计算得到的不同折射率对应的消光系数 K_{ext} 随颗粒粒径 D 的变化曲线。可以看出 K_{ext} 是一个复杂的振荡型函数,并且随着 m 的增大消光系数 K_{ext} 在振荡波形上还会出现许多毛刺,这使得(4)式的病态比一般的病态方程严重。

此外,由图 1 可见,在颗粒粒径较小时,消光系数 K_{ext} 随颗粒粒径增大单调递增并达到最大值;随着颗粒粒径的进一步增大,消光系数 K_{ext} 逐渐趋向于 2。当粒径很小时,颗粒散射近似为瑞利散射,消光系数与颗粒粒径的对应关系不明显。而粒径较大情况下消光系数约等于 2,消光系数随着颗粒粒径的变化也不明显。因此,消光光谱法的测量下限大致为 $0.1 \mu\text{m}$,而上限则大致为 $10 \mu\text{m}$ (对于相对折射率较小的颗粒,则可适当

延伸测量上限)^[15]。

以分散在水中的聚苯乙烯颗粒为模拟对象,图2为系数矩阵 A 的曲面图。其中颗粒粒径范围为 $0.1\sim 10\ \mu\text{m}$,以对数坐标表示;波长在可见光范围($0.4\sim 0.8\ \mu\text{m}$),其中,水的折射率计算采用近似公式^[16]:

$$m_m(\lambda)^2 - 1 = \frac{0.7533\lambda^2}{\lambda^2 - 0.009101} \quad (5)$$

聚苯乙烯颗粒的折射率计算公式为^[17]

$$m_p(\lambda)^2 - 1 = \frac{1.4435\lambda^2}{\lambda^2 - 0.020216} \quad (6)$$

式中波长单位为 μm 。

由图2可见,在可见光范围内系数矩阵值随波长的变化相对缓慢,而在 $0.1\sim 10\ \mu\text{m}$ 颗粒粒径范围内,系数矩阵随颗粒粒径的变化比较明显。在亚微米颗粒区域,系数矩阵值随粒径增大单调递增;在微米颗粒范围,系数矩阵值随粒径增大呈递减趋势并伴随振荡。

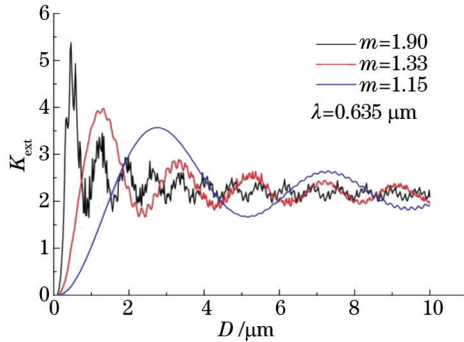


图1 消光系数曲线

Fig.1 Extinction coefficient curves

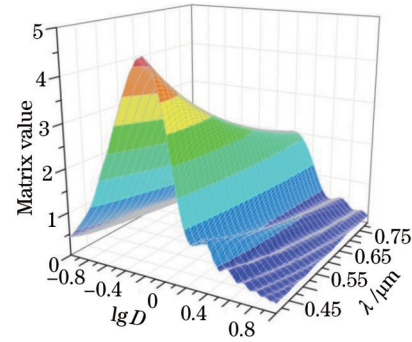


图2 系数矩阵分布图

Fig.2 Coefficient matrix

3.1 病态性在目标函数中的表现

消光光谱法是根据测量得到的消光谱信息反演计算颗粒粒径分布,即逆问题的求解。在消光光谱法中逆问题的反演求解过程一般为:设定一个颗粒粒径分布 $\{X_j^{\text{pre}}\}$,通过系数矩阵 $\{A_{ij}\}$ 计算得到一组消光值 $\{E_i^{\text{cal}}\}$;将计算得到的消光值 $\{E_i^{\text{cal}}\}$ 与测量得到的消光值 $\{E_i^{\text{meas}}\}$ 进行比较;根据比较结果调整预设的粒径分布 $\{X_j^{\text{pre}}\}$ 直到 $\{E_i^{\text{cal}}\}$ 与 $\{E_i^{\text{meas}}\}$ 充分接近。在此过程中,对粒径分布 $\{X_j^{\text{pre}}\}$ 作平滑、非负等限制。 $\{E_i^{\text{cal}}\}$ 与 $\{E_i^{\text{meas}}\}$ 的接近程度采用目标函数表示,其表达式为

$$g = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{E_i^{\text{cal}}}{\sum_{i=1}^M E_i^{\text{cal}}} - \frac{E_i^{\text{meas}}}{\sum_{i=1}^M E_i^{\text{meas}}} \right)^2 \quad (7)$$

反演计算的过程就是目标函数的极小化过程。因此,目标函数的特征反映了逆问题的病态特征。目标函数的极值情况决定了计算结果的准确性和稳定性,多个局部极值的存在容易让反演寻优结果陷入其中,无法得到全局最优,造成反演结果的偏差。

颗粒粒径分布采用对数正态分布形式:

$$f_{\text{L-N}}(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln D - \ln \bar{D}}{\sigma}\right)^2\right] \quad (8)$$

式中特征参数 \bar{D} 和 σ 分别为颗粒的尺寸参数和分布参数。

考察消光光谱法颗粒粒径测量中目标函数的极值情况及其对测量误差的敏感度。在模拟计算中,先设定一组颗粒特征参数 \bar{D} 和 σ ,由(8)式得到粒径分布函数代入(3)式计算消光值,并作为测量量 $\{E_i^{\text{meas}}\}$ 。分别用不同的颗粒特征参数 \bar{D} 和 σ 计算消光值 $\{E_i^{\text{cal}}\}$,并结合 $\{E_i^{\text{meas}}\}$ 按(7)式计算目标函数值。

图3给出了特征参数分别为 $\bar{D}=0.5\ \mu\text{m}$ 和 $\sigma=0.2$ 颗粒的目标函数曲面图和等高图。其中,图3(a)、(b)对应的 $\{E_i^{\text{meas}}\}$ 无测量误差,图3(c)、(d)加入了1%的随机测量误差。由图3(a)、(b)可见,目标函数存在多个局

部极小值,且全局最小值和很多局部极小值的数值比较接近,这对反演计算中寻找全局最优带来了较大困难。在存在1%测量误差时,图3(c)的曲面图上极小值点变得不清晰,极小值区域在图3(d)中呈一个弧形的凹槽,且与分布参数 σ 轴近似平行,这会影响寻优过程中颗粒分布宽度参数的确定。比较图3(b)、(d)可以发现,测量误差的存在未改变目标函数的分布特征,但极值点明显变差,这正是病态性的具体表现,即目标函数极值区域形态对测量误差非常敏感。因此,一方面需尝试多个预设颗粒粒径分布作为出发点,寻找局部最优解并最终从中找到全局最优解;另一方面应尽可能地减小测量误差。在实际测量中不可避免的误差必将导致反演计算中寻优的困难。从图3(d)的情形中可以预测寻优结果的两种可能情况:1) 粒径参数 \bar{D} 偏大、分布偏窄(参数 σ 偏小);2) 粒径参数 \bar{D} 偏小、分布偏宽(参数 σ 偏大)。

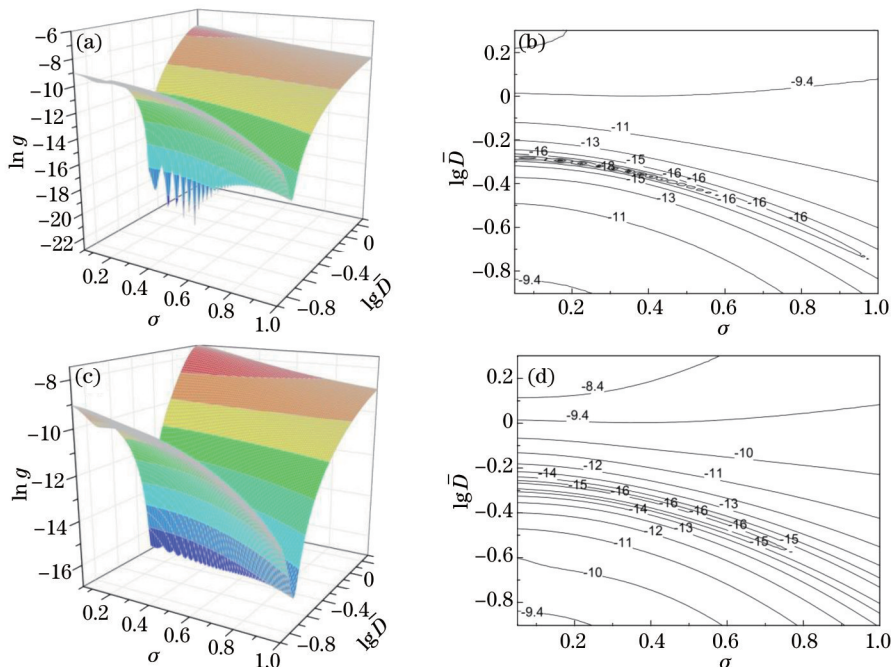


图3 颗粒粒径为 $0.5 \mu\text{m}$ 的目标函数。(a) 无测量误差的曲面图;(b) 无测量误差的等高图;(c) 存在1%测量误差的曲面图;(d) 存在1%测量误差的等高图

Fig.3 Objective function for the particle with diameter $0.5 \mu\text{m}$. (a) Surface without error; (b) contour lines without error; (c) surface with 1% error; (d) contour lines with 1% error

图4给出了特征参数分别为 $\bar{D}=2.1 \mu\text{m}$ 和 $\sigma=0.2$ 颗粒的目标函数曲面图和等高图。其中,图4(a)、(b)无测量误差,图4(c)、(d)加入了2%随机测量误差。可以看出,即使存在2%的测量误差,其目标函数的形态与无测量误差时相比,极值区域略有扩展,但目标函数的全局最小值仍出现在预设的特征参数附近。

比较图3和图4可以看出,在消光光谱法颗粒粒径测量中病态性问题对目标函数的影响非常明显。尤其是亚微米颗粒,其目标函数极值情况较差,且对测量误差非常敏感,较小的误差将引起目标函数分布出现明显变化,导致寻优的困难。对于微米级的较大颗粒,对应的目标函数极值情况相对较好,对误差的敏感度较低。

此外,尝试不同形式的目标函数[譬如(9)式],模拟计算并未体现出明显的差异。

$$g = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} \left(\frac{E_i^{\text{cal}}}{E_{i+1}^{\text{cal}}} - \frac{E_i^{\text{meas}}}{E_{i+1}^{\text{meas}}} \right)^2. \quad (9)$$

3.2 病态性对反演结果的影响

消光光谱法中最为关键的是颗粒粒径分布的反演重建。采用Powell算法^[18]进行反演计算。由于目标函数存在多极值情况,若起始点选择不好,将很容易陷入局部极小值。为此,优化了起始点选择策略,选取多个起点通过寻优得到多组解及对应的残差值,通过比较将残差值最小的解作为反演最优解,这样能避免陷入局部极小值,找到全局最优解。

考察消光光谱法中病态性问题在反演颗粒尺寸分布中的影响。颗粒的粒径参数 \bar{D} 分别取 0.5 、 0.7 、 1.5 、 2.1 、 3.1 和 $5.1 \mu\text{m}$,分布参数 σ 分别取 0.2 和 0.5 。通过随机数模拟测量误差,分别取 0% 、 1% 和 2% ,每组同一

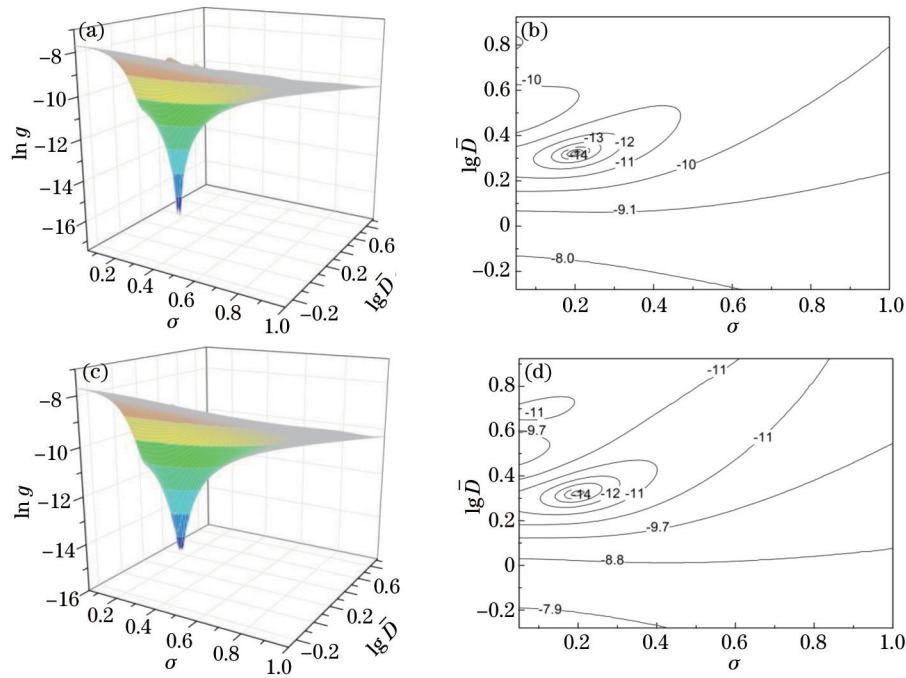


图4 颗粒粒径为 $2.1 \mu\text{m}$ 的目标函数。(a) 无测量误差的曲面图;(b) 无测量误差的等高图;(c) 存在2%测量误差的曲面图;(d) 存在2%测量误差的等高图

Fig.4 Objective function for the particle with diameter $2.1 \mu\text{m}$. (a) Surface without error; (b) contour lines without error; (c) surface with 2% error; (d) contour lines with 2% error

误差水平重复 $n = 50$ 次计算,反演结果的不确定度 c 和综合反演误差 ξ 计算表达式为^[12]

$$c = \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sigma_j^2 \right)^{1/2}, \quad (10)$$

$$\xi = \frac{\left[\sum_{j=1}^N (X_j^0 - \bar{X}_j)^2 \right]^{1/2}}{\left[\sum_{j=1}^N (X_j^0)^2 \right]^{1/2}}, \quad (11)$$

式中 \bar{X}_j 为反演分布的平均值, σ_j^2 为相应的方差,其表达式分别为

$$\bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_j^t, \quad (12)$$

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (X_j^t - \bar{X}_j)^2, \quad (13)$$

式中 X_j^0 为设定分布; X_j^t 为第 t 次反演分布, $t = 1, 2, \dots, n$ 。

从表1的模拟计算反演结果可见,在分布较窄($\sigma = 0.2$)时,粒径参数为 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $0.7 \mu\text{m}$ 的小颗粒反演结果误差较大,且稳定性差(不确定度值大),表明对测量误差非常敏感,病态性严重;而粒径参数为 1.5 、 2.1 、 $3.1 \mu\text{m}$ 的较大颗粒反演结果相对较好,在存在2%测量误差时仍能得到较稳定准确的结果;当颗粒粒径达 $5.1 \mu\text{m}$ 时,稳定度、准确度有所下降。颗粒分布较宽($\sigma = 0.5$)时, $0.7 \mu\text{m}$ 颗粒的反演结果有所改善,但 $0.5 \mu\text{m}$ 小颗粒的反演结果对误差依然非常敏感, 2.1 、 3.1 、 $5.1 \mu\text{m}$ 颗粒的反演误差较窄分布情况时略有升高,但仍比较理想。

由以上反演计算可知,由于消光光谱法中病态性问题的存在,造成目标函数存在多个局部极小值,且对于测量误差比较敏感,较小的测量误差将使目标函数极值情况变差,从而导致反演结果的准确性和稳定性较差,在小颗粒的测量中表现得尤为严重。消光光谱法对于微米级颗粒的测量结果较为理想,当颗粒粒径接近测量上限时(譬如 $5.1 \mu\text{m}$ 以上),反演结果对测量误差的敏感度有所上升。

表1 模拟计算反演结果
Table 1 Simulation inversion results

(\bar{D}, σ)	Error /%	c	ξ	(\bar{D}, σ)	Error /%	c	ξ
	0	2.30×10^{-16}	1.10×10^{-6}		0	1.07×10^{-16}	5.31×10^{-7}
(0.5,0.2)	1	1.01	3.89×10^{-1}	(0.5,0.5)	1	8.97×10^{-1}	5.73×10^{-1}
	2	1.12	5.22×10^{-1}		2	1.08	8.95×10^{-1}
	0	1.72×10^{-16}	3.23×10^{-7}		0	1.28×10^{-16}	6.46×10^{-8}
(0.7,0.2)	1	1.05	6.97×10^{-1}	(0.7,0.5)	1	7.20×10^{-2}	9.08×10^{-3}
	2	1.06	6.82×10^{-1}		2	4.95×10^{-1}	1.49×10^{-1}
	0	2.06×10^{-16}	1.05×10^{-8}		0	1.17×10^{-16}	9.92×10^{-8}
(1.5,0.2)	1	4.13×10^{-2}	3.48×10^{-3}	(1.5,0.5)	1	3.76×10^{-2}	2.00×10^{-3}
	2	8.54×10^{-2}	7.21×10^{-3}		2	8.49×10^{-2}	1.04×10^{-2}
	0	2.17×10^{-16}	5.32×10^{-8}		0	1.01×10^{-16}	2.13×10^{-7}
(2.1,0.2)	1	3.38×10^{-2}	5.07×10^{-3}	(2.1,0.5)	1	1.75×10^{-1}	3.91×10^{-2}
	2	5.58×10^{-2}	1.11×10^{-2}		2	6.83×10^{-1}	2.74×10^{-1}
	0	1.92×10^{-16}	1.16×10^{-7}		0	1.28×10^{-16}	1.84×10^{-7}
(3.1,0.2)	1	2.89×10^{-2}	4.26×10^{-3}	(3.1,0.5)	1	7.95×10^{-2}	1.53×10^{-2}
	2	5.66×10^{-2}	4.49×10^{-3}		2	6.21×10^{-1}	2.46×10^{-1}
	0	1.74×10^{-16}	4.95×10^{-7}		0	1.25×10^{-16}	6.24×10^{-7}
(5.1,0.2)	1	3.25×10^{-1}	6.30×10^{-2}	(5.1,0.5)	1	5.38×10^{-1}	1.03×10^{-1}
	2	8.99×10^{-1}	3.85×10^{-1}		2	7.91×10^{-1}	2.32×10^{-1}

4 实验研究

采用消光光谱法对标准颗粒进行实验测量。以卤素灯(HL-2000, Ocean Optics, 美国)为光源, 波长范围为 $0.36 \sim 2 \mu\text{m}$, 利用光纤光谱仪(USB4000, Ocean Optics, 美国)形成不同波长单色光, 可探测范围为 $0.2 \sim 0.85 \mu\text{m}$, 分辨率为 1.5 nm 。实验测量结构示意图如图5所示。测试样品为由 Beckman Coulter 公司生产的标称值为 $0.5 \mu\text{m}$ 的聚苯乙烯标准颗粒和北京海岸鸿蒙标准物质公司生产的标称值为 700 nm [GBW(E) 120087]、 $2.1 \mu\text{m}$ [GBW(E) 120021]、 $3.1 \mu\text{m}$ [GBW(E) 120022] 的聚苯乙烯标准颗粒。



图5 消光光谱法测量结构示意图

Fig.5 Schematic of measurement system based on the spectral extinction technique

将标准颗粒均匀分散在蒸馏水中形成单分散颗粒系。每次测量通过光谱仪采集透射率谱, 为得到较高的信噪比, 用光谱仪对光强信号作多次采集(100次)取平均。在后续的数据处理中, 在可见光范围内($0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$)选取30个波长。

图6给出了4种聚苯乙烯标准颗粒实验测量的反演结果, 每种标准颗粒都进行了多次测量, 采用 Powell 算法进行反演。总体来看, 消光光谱法实验测量结果比较可靠。但是图6(a)中 $0.5 \mu\text{m}$ 颗粒5次测量粒径分布峰值分别在 0.494 、 0.450 、 0.505 、 0.517 、 $0.420 \mu\text{m}$, 反演结果不稳定; 图6(b)中 $0.7 \mu\text{m}$ 颗粒的5次测量粒径分布峰值在 $0.784 \mu\text{m}$ 或 $0.803 \mu\text{m}$, 准确度欠佳; 相比之下, 图6(c)、(d)所示 $2.1 \mu\text{m}$ 和 $3.1 \mu\text{m}$ 的颗粒测量结果更加稳定准确, 5次测量粒径分布峰值位置分别位于 $2.073 \mu\text{m}$ 和 $2.933 \mu\text{m}$ 。

5 结论

在可见光范围内对消光光谱法颗粒测量技术中的病态性问题进行了研究。通过模拟计算分析讨论了病态性问题的特征和具体影响, 计算表明在消光光谱法测量中亚微米级颗粒的病态性表现得更为严重, 目标函数极值情况和反演计算结果对误差非常敏感, 1%的测量误差足以影响粒径分布反演结果, 反演结果的稳定性和准确度较差; 微米级颗粒的情况相对较好, 目标函数极值情况和反演计算结果较为理想。对4种单分散聚苯乙烯标准颗粒进行了实测反演, 结果进一步表明了小颗粒处的病态性比较严重, 在采用消光光谱

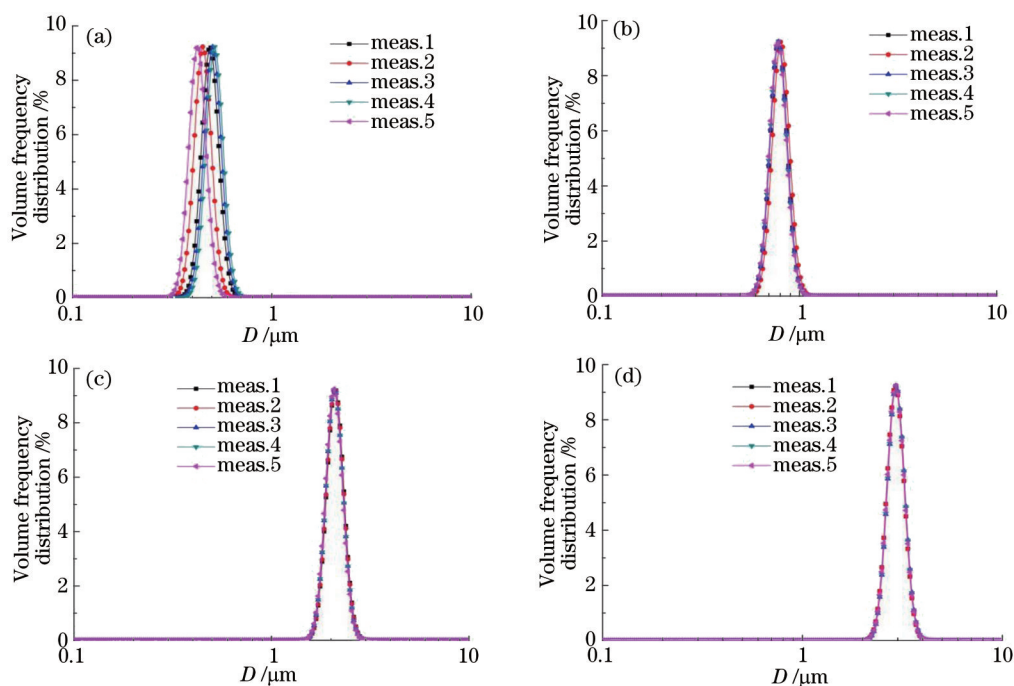


图6 聚苯乙烯标准颗粒实验测量反演结果。(a) 0.5 μm ; (b) 0.7 μm ; (c) 2.1 μm ; (d) 3.1 μm

Fig.6 Experimental inversion results for standard polystyrene particles. (a) 0.5 μm ; (b) 0.7 μm ; (c) 2.1 μm ; (d) 3.1 μm

法对小颗粒进行测量时,为保证测量的准确性应尽可能减小误差,用 Powell 算法进行计算时应选取多个起始点以获取全局最优解。

参考文献

- 1 Wang Zhiyong, Cai Xiaoshu, Xu Changze, *et al.*. Nanoparticle sizing by image processing with dynamic light scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0129002.
王志永, 蔡小舒, 徐呈泽, 等. 动态光散射图像法测量纳米颗粒粒度研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0129002.
- 2 Sun Han, G Lamanna, B 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, G Lamanna, B 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.
- 3 Ge Baozhen, Pan Linchao, Zhang Fugen, *et al.*. Abnormal moving of scattered energy distribution and its effect on particle size analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0629001.
葛宝臻, 潘林超, 张福根, 等. 颗粒散射光能分布的反常移动及其对粒度分析的影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0629001.
- 4 D H Melik, H S Fogler. Turbidimetric determination of particle size distributions of colloidal systems[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1983, 92(1): 161–180.
- 5 G Crawley, M Cournil, D D Benedetto. Size analysis of fine particle suspensions by spectral turbidimetry: Potential and limits[J]. *Powder Technology*, 1997, 91(3): 197–208.
- 6 Sun Xiaogang, Tang Hong, Yuan Guibin. Analysis of visible extinction spectrum of particle system and selection of optimal wavelength[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(9): 1968–1973.
孙晓刚, 唐 红, 原桂彬. 颗粒系的可见消光光谱分析及最佳波长的选择[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(9): 1968–1973.
- 7 O Peña, L Rodríguez-Fernández, V Rodríguez-Iglesias, *et al.*. Determination of the size distribution of metallic nanoparticles by optical extinction spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(3): 566–572.
- 8 F Onofri, K F Ren, C Grisolia. Development of an *in situ* ITER dust diagnostic based on extinction spectrometry: Dedicated light scattering models[J]. *Journal Nuclear Materials*, 2009, 390: 1093–1096.
- 9 J M Smith, A Roth, D E Huffman, *et al.*. Multi-wavelength transmission spectroscopy revisited for micron and submicron particle characterization[J]. *Applied Spectroscopy*, 2012, 66(10): 1186–1196.
- 10 Bo Guangyu, Liu Dong, Wu Decheng, *et al.*. Two-wavelength lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties in fog and haze days[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0113001.
伯广宇, 刘 东, 吴德成, 等. 双波长激光雷达探测典型雾霾气溶胶的光学和吸湿性质[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0113001.

- 11 F Ferri, A Bassini, E Paganini. Modified version of the Chahine algorithm to invert spectral extinction data for particle sizing[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(25): 5829–5839.
- 12 J Mroczka, D Szczuczyński. Improved regularized solution of the inverse problem in turbidimetric measurements[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(24): 4591–4603.
- 13 Dou Zhenhai, Wang Yajing, Shen Jin, *et al.*. A hybrid non-negative inversion of dynamic light scattering based on truncated singular value decomposition[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0608001.
窦震海, 王雅静, 申 晋, 等. 动态光散射混合非负截断奇异值反演[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0608001.
- 14 L Wang, X Sun, J Xing. Determination of particle size distribution by light extinction method using improved pattern search algorithm with Tikhonov smoothing functional[J]. *Journal of Modern Optics*, 2012, 59(21): 1829–1840.
- 15 Cai Xiaoshu, Su Mingxu, Shen Jianqi, *et al.*. Particle Size Measurement Techniques and Applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 115–130.
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: 115–130.
- 16 G M Hale, M R Querry. Optical constants of water in the 200 nm to 200 μm wavelength region[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(3): 555–563.
- 17 N Sultanova, S Kasarova, I Nikolov. Dispersion properties of optical polymers[J]. *Acta Physica Polonica–Series A General Physics*, 2009, 116(4): 585–587.
- 18 Chen Baolin. Optimization Theory and Algorithm[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 291–306, 349–358.
陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 291–306, 349–358.

栏目编辑: 吴秀娟