

小角前向散射激光测粒仪中折射率对测量结果的影响

沈建琪 蔡小舒 王乃宁

(上海理工大学物理教研室 上海 200093)

提要 在经典 Mie 散射理论上,利用 POWELL 反演方法研究了小角前向散射激光测粒仪中输入折射率对测量结果的影响。对于输入折射率与待测颗粒实际折射率没有偏差的情况,数据处理导致的测量误差在 0.002% 之内;而对于两者存在偏差的情况,当输入折射率在(2.0, 4.0) 范围内时数据处理误差较小,输入折射率在(1.1, 2.0) 范围内时数据处理误差显然较大。从而得出结论:在测量过程中应尽可能输入与颗粒实际折射率一致的数值;当无法确知颗粒实际折射率时,比较可靠的办法是适当选择一个大于 2.0 的数值作为输入折射率进行数据处理。

关键词 激光测粒仪,小角前向散射,Mie 散射理论,折射率

1 前 言

在颗粒问题中,颗粒的尺寸分布往往是一个十分关键的参数,颗粒粒度的测量是颗粒测试技术中最重要也是最基本的测量。为此,多年来人们发展了多种基于不同工作原理的测量方法和测量仪器。在众多的测粒技术中,光散射法以其优异的性能得到了极大的重视并迅速占据了国际市场^[1]。小角前向散射激光测粒技术是发展得较早且也是较成熟的一种光散射测粒方法,它通过采集待测颗粒在前向某个小角度范围内的散射光来得到颗粒的粒径分布信息,有早期的基于夫朗和费衍射理论(简称 FD 理论)的 FD 式激光测粒仪和基于经典 Mie 散射理论的 Mie 小角前向散射激光测粒仪。众所周知,FD 式激光测粒仪的优点在于无需知道待测颗粒的折射率,理论比较简单,但仅适用于测量粒径较大的颗粒;而基于 Mie 散射理论的小角前向散射激光测粒仪的优点是能够较准确地测量较小粒径的颗粒,但在其数据处理过程中必须输入折射率参数,因此输入折射率与待测颗粒折射率的一致性成为影响测量结果的一个突出问题。

文献[2]对浊度光谱法测粒技术中颗粒折射率对测量结果的影响进行了详细的研究,但类似的工作在其他颗粒技术中还比较少。本文研究 Mie 小角前向散射激光测粒仪数据处理过程中输入折射率对测量结果的影响并提出解决办法。

2 测量原理

小角前向散射激光测粒仪由激光器、扩束器、傅里叶接收透镜、光电探测元件、A/D 转换

器和计算机组成。本文中光电探测元件采用常用的具有 31 个环单元的半环形光电检测器, 每环的内外半径 ($R_{j,in}, R_{j,out}$) 均已确定^[3]。当确定接收透镜的焦距 f 以后, 各环对应的散射角 θ 范围 ($\theta_{j,in}, \theta_{j,out}$) 就由下式完全确定

$$\begin{aligned}\theta_{j,in} &= \arctg(R_{j,in}/f) \\ \theta_{j,out} &= \arctg(R_{j,out}/f)\end{aligned}\quad j = 1, 2, \dots, 31 \quad (1)$$

根据 Mie 散射理论, 颗粒的散射光强为粒径参数 α ($\alpha = \pi D/\lambda$), 折射率 n 和散射角 θ 的函数, 记作 $I(\alpha, n, \theta)$ ^[4]。光电探测元件上各环探测到的散射光通量为

$$F_j = \int_{\theta_{j,in}}^{\theta_{j,out}} d\varphi \int_{\theta_{j,in}}^{\theta_{j,out}} I(\alpha, n, \theta) \sin\theta d\theta \quad j = 1, 2, \dots, 31 \quad (2)$$

对于给定的颗粒 (D, n), 各环散射光通量随散射角 θ 的分布呈现一定的规律^[5]。颗粒的散射特性决定了测粒仪的测量下限^[6]。在颗粒的测量过程中, 可根据待测颗粒的具体情况选择合理焦距的透镜以确保适当的散射角范围从而得到能反映该颗粒散射特性的各环散射光通量 $F_s(F_{s,1}, F_{s,2}, \dots, F_{s,31})$ 。

本文通过数值计算模拟方法研究折射率对测量结果的影响, 可由以下过程表示:

1) 设定颗粒粒径和折射率 (D, n), 由公式 (2) 计算光电探测元件各环的散射光通量 $F_s(F_{s,1}, F_{s,2}, \dots, F_{s,31})$ 作为模拟量;

2) 输入不同数值的折射率 n' , 利用优化方法寻求某个颗粒粒径 D' 使由公式 (2) 计算得到的光通量 $F_c(F_{c,1}, F_{c,2}, \dots, F_{c,31})$ 与模拟量 $F_s(F_{s,1}, F_{s,2}, \dots, F_{s,31})$ 最接近即目标函数 G 最小

$$G = \sum_{j=1}^{31} (1 - F_{c,j}/F_{s,j})^2 \quad (3)$$

3) 得到由于过程 2) 中输入折射率 n' 与过程 1) 中颗粒折射率 n 之间的偏离导致的数据处理误差

$$E = \frac{D' - D}{D} \times 100\% \quad (4)$$

3 输入折射率对测量结果的影响

研究 Mie 小角前向散射激光测粒仪数据处理过程中输入折射率对测量结果的影响可从两方面进行: (1) 给定颗粒的粒径和实际折射率 (D, n), 数据处理时分别输入不同数值的折射率 n' , 得到数据处理误差 E 随输入折射率 n' 的变化规律 ($E \sim n'$ 曲线); (2) 给定颗粒实际折射率 n , 在数据处理时输入某一定数据的折射率 n' , 对不同粒径 D 研究其数据处理误差 E ($E \sim D$ 曲线)。

3.1 数据处理误差 E 与输入折射率 n' 的关系

作为示例, 图 1 给出了小粒径 ($D = 1.0 \mu\text{m}$) 的折射率较小的非吸收性颗粒 (图 1(a)) 和吸收性颗粒 (图 1(b)) 以及折射率相对较大的非吸收性颗粒 (图 1(c)) 的 $E \sim n'$ 曲线。可以看出, 对于各种不同折射率的小粒径颗粒, 其数据处理误差 E 与输入折射率 n' 的关系具有相似的规律。当 n' 选择在 (1.1, 1.8) 范围内时, 数据处理误差 E 随 n' 的变化较大 (从 + 30% 递减到 - 15%); 当 n' 在 (1.8, 4.0) 范围内时, 数据处理误差 E 随 n' 的变化较小 (绝大部分在 - 10% 和 + 10% 之间)。图中输入折射率 n' 与实际折射率 n 相等处数据处理误差几乎为零。

与图 1 相对应, 图 2 给出了粒径相对稍大 ($D = 10 \mu\text{m}$) 颗粒的 $E \sim n'$ 曲线。当 n' 在 (1.1,

2.0) 范围内变化时, 数据处理误差 E 大部分在 -10% 到 $+10\%$ 范围内; 当 n' 在 $(2.0, 4.0)$ 范围内时, 数据处理误差 E 值在 -2% 到 $+2\%$ 范围内。

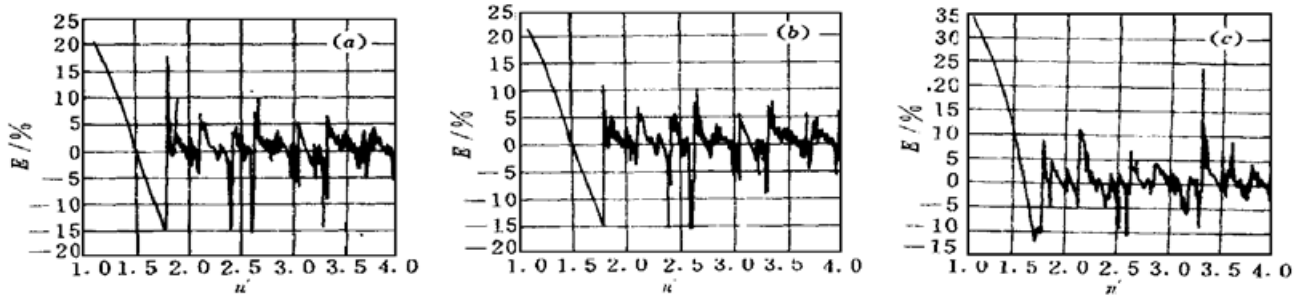


图 1 粒径为 $D = 1.0 \mu\text{m}$ 颗粒的 $E \sim n'$ 曲线

Fig. 1 The $E \sim n'$ curves of particle ($D = 1.0 \mu\text{m}$)

(a) $n = 1.5 - i0.0$; (b) $n = 1.5 - i0.5$; (c) $n = 3.0 - i0.0$

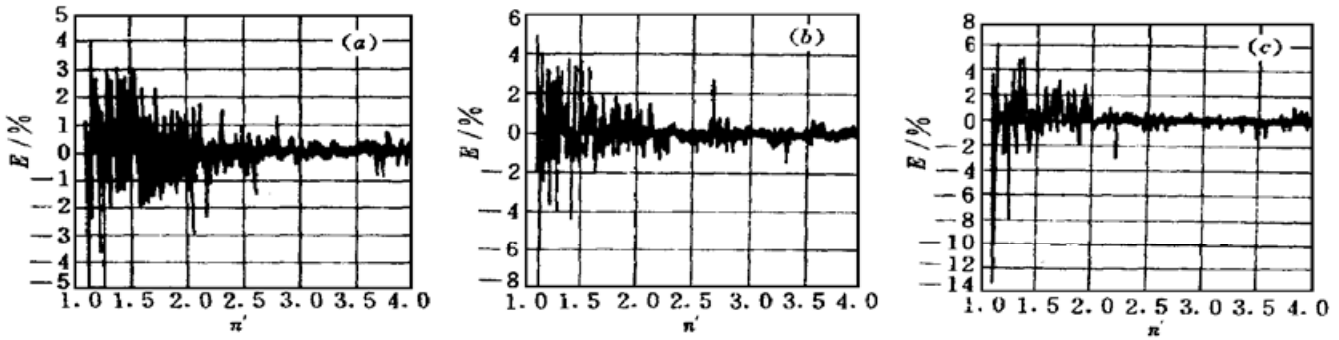


图 2 粒径为 $D = 10 \mu\text{m}$ 颗粒的 $E \sim n'$ 曲线

Fig. 1 The $E \sim n'$ curves of particles ($D = 10 \mu\text{m}$)

(a) $n = 1.5 - i0.0$; (b) $n = 1.5 - i0.5$; (c) $n = 3.0 - i0.0$

图 1 和图 2 分别给出了较小粒径和较大粒径颗粒的数据处理误差与输入折射率的关系, 它们具有相同的规律, 可以归结为: (1) 当输入折射率 n' 在 $(1.1, 2.0)$ 范围内时, 输入折射率与实际折射率的偏离导致的数据处理误差较大; (2) 当输入折射率 n' 在 $(2.0, 4.0)$ 范围内时, 输入折射率与实际折射率的偏离导致的数据处理误差较小; (3) 当输入折射率与实际折射率一致时, 数据处理误差最小(几乎为零)。

3.2 不同粒径颗粒的数据处理误差 E

图 3 给出了输入折射率 n' 与颗粒的实际折射率 n 存在偏离情况下, 导致的数据处理误差 E 随待测颗粒粒径的变化情况(即 $E \sim D$ 曲线)。其中图 3(a) 为输入折射率偏小($n' < 1.8$) 时数据处理误差情况; 图 3(b) 为输入折射率偏大($n' > 2.0$) 时数据处理误差情况。显然, 选用 $n' > 2.0$ 的输入折射率可以得到较小的数据处理误差, 而选用 $n' < 1.8$ 的输入折射率数据处理误差较大。对于输入折射率与颗粒实际折射率完全相同的情况, 模拟计算给出数据处理误差 E 绝对值恒小于 0.002% 。

图 4 为空气中水滴(折射率为 $n = 1.33$) 分别用 $n' = 1.30$ (输入折射率 n' 与实际折射率 n 存在较小的偏离量, 如图 4(a)) 和 $n' = 3.0$ (输入折射率 n' 采用大于 2.0 的数值, 如图 4(b)) 作为输入折射率代入计算得到的数据处理误差 E 随粒径 D 的变化情况($E \sim D$ 曲线)。显而易见, 即使对于输入折射率比较接近实际折射率的情况, 由于其输入折射率与颗粒实际折射率存在

偏离, 仍然导致了较大的误差; 而采用 $n' > 2.0$ 则可得到误差相对较小的测量结果。由此得出结论: 在能够输入与颗粒实际折射率相同的 n' 情况下应尽可能输入确切的折射率数值; 在无法查到颗粒实际折射率情况下, 比较可靠的办法是用大于 2.0 的数值作为输入折射率进行数据处理。

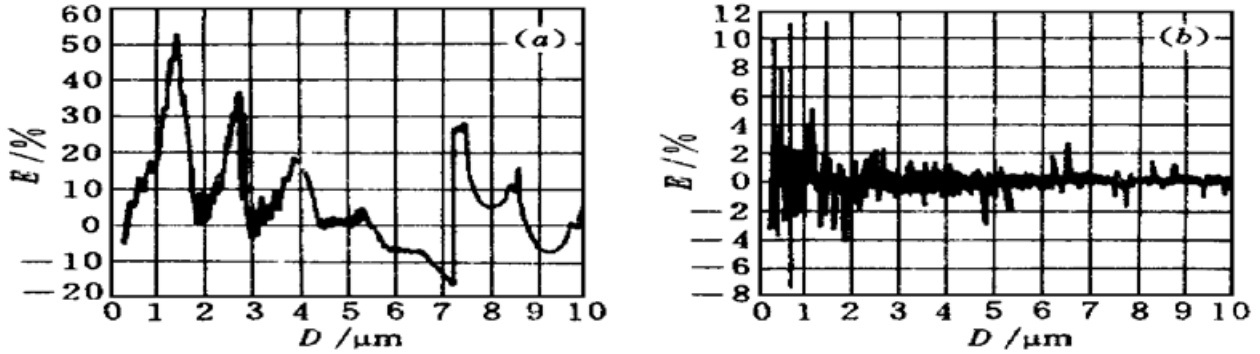


图 3 不同折射率的颗粒在输入折射率不同偏离情况下的 $E \sim D$ 曲线

Fig. 3 The $E \sim D$ curves when n' is different from the real index of the particle

(a) $n = 1.5 - i0.0$, $n' = 1.1$; (b) $n = 1.5 - i0.0$, $n' = 3.0$

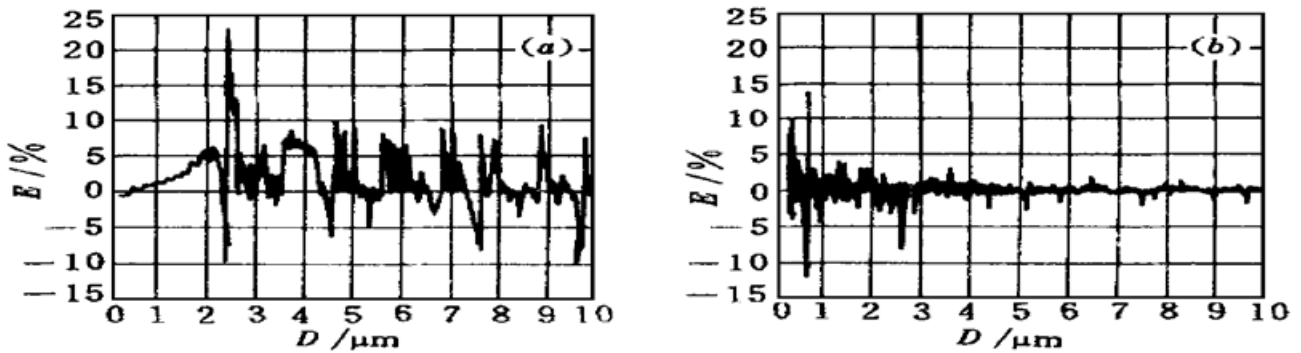


图 4 水滴 ($n = 1.33$) 在输入折射率不同偏离情况下的 $E \sim D$ 曲线

Fig. 4 The $E \sim D$ curves of water droplets in air

(a) $n' = 1.30$; (b) $n' = 3.0$

4 结 论

在 Mie 小角前向散射激光测粒仪的数据处理过程中, 输入折射率与颗粒实际折射率的偏离可对测量结果产生很大的影响。当输入折射率与实际折射率没有偏差时输入折射率导致的数据处理误差一般小于 0.002%。而当输入折射率与实际折射率存在偏差时, 输入折射率 n' 在 (1.1, 2.0) 范围内时, 数据处理误差相对较大; n' 在 (2.0, 4.0) 范围内时, 数据处理误差相对较小。

因此, 必须对输入折射率进行合理的选择。对于能够查找得到折射率的待测颗粒, 应尽可能选择颗粒的实际折射率数值; 对于绝大部分无法得到确切折射率的待测颗粒或者混合颗粒体系, 应选用一个大于 2.0 的数值作为输入折射率进行数据处理。

参 考 文 献

- 1 T. Allen. Particle Size Measurement, 4th. ed. London: Chapman and Hall, 1990
- 2 Wang Naining, Wei Jinming, Hong Changyi *et al.*. Influence of refractive index on particle size analysis using the turbidimetric spectrum method. *Part. Part. Syst. Charact.*, 1996, 13(4): 238~ 244

- 3 E. D. Hirlleman. Particle Sizing by Optical, Nonimaging Techniques, in J. M. Tishkoff eds: Liquid Particle Size Measurement Techniques, ASTM, 1984, STP 848, 35~ 60
- 4 Van de Hulst H. C. . Light Scattering by Small Particles. London: Chapman and Hall, 1957. 132~ 134
- 5 Shen Jianqi, Wang Naining. A discussion on the criterion number X of the small-angle forward scattering laser particle sizer. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(10): 891~ 896 (in Chinese)
- 6 Shen Jianqi, Wang Naining. A Discussion on the Low Limit of the Small-angle Forward Scattering Laser Particle Sizer, First Annual of Chinese Society of Particuology. Beijing: Qinghua University, 1997. Sept. 16, 508~ 512

The Influence of the Inputted Refractive Index of the Small-angle Forward Scattering Laser Particle Sizer

Shen Jianqi Cai Xiaoshu Wang Naining

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093)

Abstract Based on the classical Mie scattering theory, the influence on the measured results which is caused by the inputted refractive index in data processing of the small-angle forward scattering laser particle sizer is investigated by means of POWELL inversion algorithm. The error would be within 0.002% in the case that the inputted refractive index equals exactly the natural one of the measured particles. Otherwise, when the inputted refractive index is in the range of (2.0, 4.0) the magnitude of the error would be much less than in the range of (1.1, 2.0). So, it comes to the conclusion that the value of the natural refractive index should be inputted in data processing if possible and a value larger than 2.0 should be believably chosen as the inputted refractive index if the natural refractive index of the measured particles is unknown.

Key words laser particle sizer, small-angle forward scattering, Mie scattering theory, refractive index