

# 扩展激光测粒仪测量下限的一种计算方法

郑刚 王乃宁 虞先煌

(上海机械学院, 上海 200093)

**提要** 本文提出一种求亚微米级颗粒尺寸分布的计算方法, 数值计算及实测表明, 这种方法能有效地将激光测粒仪的测量下限扩展至  $0.1 \mu\text{m}$ 。

**关键词** 激光测粒仪, 亚微米, 颗粒, 计算方法

## A new algorithm for expanding measurement lower-limit of laser particle sizer

ZHENG Gang, WANG Naining, YU Xianhuang

(Shanghai Institute of Mechanical Engineering, Shanghai 200093)

**Abstract** In this paper, a new algorithm for solving inversion of size distribution of submicron sized small particles is proposed. Numerical simulation and experimental study demonstrate that this method can effectively expand the measurable lower limit of laser particle sizer to  $0.1 \mu\text{m}$ .

**Key words** laser particle sizer, submicron, particle, algorithm

## 1 引言

目前广泛使用的激光测粒仪其测量下限仅为  $1 \mu\text{m}$  左右<sup>[1]</sup>, 尽管现在市场上也能见到下限至  $0.1 \mu\text{m}$  的最新激光粒度仪<sup>[2,3]</sup>, 但无论是原理还是使用都存在一定的局限性<sup>[4]</sup>。本文提出一种用普通激光测粒仪(毋需改变其结构参数)测亚微米级颗粒的计算方法, 并用此方法, 对某些颗粒进行了实测, 结果令人满意。

## 2 原理与方法

激光测粒仪的光路如图1所示, 颗粒样品置于 Fourier 变换透镜的前面。颗粒散射的光能在光电探测器上的分布由变换透镜的焦距唯一地确定, 通常根据焦距及光电探测器的几何尺寸, 由式<sup>[1]</sup>

$$x = \frac{\pi}{\lambda} d \frac{s}{f} = 1.357 \quad (1)$$

确定颗粒的分档尺寸,式中  $d$  为颗粒直径,  $s$  为光电探测器的径向半径,  $f$  为变换透镜的焦距,由式(1)可见,在光靶尺寸  $s$  确定的情况下,改变焦距  $f$ ,可改变颗粒的尺寸分档。事实上,由于透镜设计和加工工艺水平的限制,目前的激光测粒仪配备的 Fourier 透镜的最小焦距为  $f = 63 \text{ mm}$ ,因此

最小被测颗粒尺寸只能到  $1 \mu\text{m}$  左右。换句话说,当颗粒尺寸处在亚微米级时,由颗粒产生的前向散射光的较大部分已不能被光电探测器接收,因而导致常规的反演颗粒尺寸分布的算法失效。然而,从理论上讲,无论是大颗粒还是小颗粒,由其散射的前向光能总有一部分被光靶所接收,尽管颗粒大时,接收到的光能多一点,颗粒小时,接收到的光能少一点。因此,寻找一种合适的算法是有可能从光靶接收到的散射谱反演出颗粒粒径分布。我们采用一维寻优方法所做的数值模拟及对亚微米级颗粒的实测,证实了上述想法。

反演算时,采用函数限制(dependent model)解法,即假设颗粒尺寸分布符合某一双参数函数关系<sup>[1,5]</sup>,这是测粒仪中反推颗粒尺寸分布的最常用算法之一。下面以 Rosin-Rammler 分布

$$dD = N \left( \frac{D^{N-1}}{\bar{D}^N} \right) \exp \left\{ - \left( \frac{D}{\bar{D}} \right)^N \right\} \quad (2)$$

为例说明求解方法,式(2)中  $\bar{D}$ ,  $N$  为常数,分别为尺寸参数和分散参数。所谓求颗粒的尺寸分布实际上就是确定参数  $(\bar{D}, N)$  的值,使符合该函数的颗粒群所散射的在光靶上的理论光能分布与该颗粒群的实测光能分布最佳拟合,即求解下式

$$\min \{OBF\} = \min \left\{ \sum_{m=1}^{15} (E_{cm} - E'_m)^2 \right\} \quad (3)$$

式中  $E_{cm}$  为第  $m$  环的理论光能,  $E'_m$  为实测光能,关于光靶上光能的理论计算可参阅文献[1]。对于亚微米级的颗粒,确定双参数  $(\bar{D}, N)$  的过程为:先取定分布参数  $N$  的一个值,然后用一维优化方法如抛物线法<sup>[6]</sup>求出  $\bar{D}$  的值和对应的拟合误差  $A(OBF)$ ,这样,取一组  $N$  的值,可得到对应的一组  $\bar{D}$  和  $A(OBF)$ ,显然,使  $A(OBF)$  最小的一对参数  $(\bar{D}^*, N^*)$  即为最佳拟合参数,由它确定的式(2)就是被测颗粒的尺寸分布函数。当然  $N$  的值取得越多、越密,求得的  $(\bar{D}^*, N^*)$  越接近实际。考虑到计算机的运算速度和实际测量要求,对  $N$  的取值可从大到小或从小到大以一定步长间隔进行,具体取值由实际测量的精度要求和计算速度折衷处理。

### 3 数值模拟与实测结果

采用上述计算步骤,对微米及亚微米级的颗粒进行了大量的数值模拟计算,表 1 给出了部分计算结果,计算时设 Fourier 变换透镜的焦距  $f = 63 \text{ mm}$ ,颗粒尺寸符合  $R-R$  分布,取参数  $N$  的步长  $NS = 0.5$ 。由表可见,上述反演算法能给出令人满意的计算结果。显然,步长  $NS$  取得越小,反演  $(\bar{D}, N)$  的精度会越高。此外,我们还模拟了测量误差对计算结果的影响。表 2 给出了部分计算结果。No. 1 是在光靶第 14 环(光靶总共设置为 15 个环)的能量上加 7% 的误差(相当于 12 位 A/D 转换器的 30 个量化单位),No. 2 是在光靶第 11, 14 环上加 7% 的误差, No. 3 是在光靶第 5, 8, 11, 14 环上加 7% 的误差。表 2 表明,在有 7% 的测量误差的条件下,本文算法仍能给出较高的计算精度。表 3 是对某些亚微米级颗粒的实测结果,从对标准粒子(由英国 Poly. Inc. 生产)的测量结果来看,误差小于 7%,其他工业颗粒由上海某些厂家提供,其名义值用了圆盘离心沉降法的测量值,可见与本法结果一致,测量时颗粒悬浮于纯净的蒸馏水中,

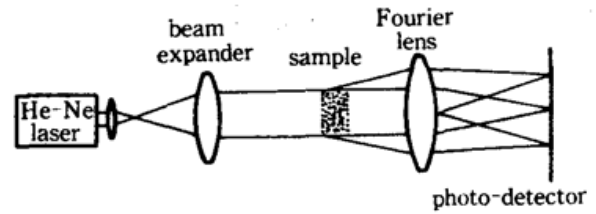


Fig. 1 Schematic diagram of laser particle sizer

表中的折射率  $n$  为颗粒相对于水的折射率,  $D_{32}$  是指 Sauter 平均直径, 计算时均用 Mie 理论修正, 表 4 给出了对  $0.58 \mu\text{m}$  标准颗粒的 10 次重复测量结果, 最大测量偏差小于  $1.3\%$ 。可见本法对小颗粒的测量仍给出很高的重复测量精度。

Table 1 Results of numerical simulation

Assumed value	$\bar{D}$ ( $\mu\text{m}$ )	0.15	0.26	0.43	0.75	1.2
	$N$	6.4	4.3	10.0	3.6	5.1
Calculated value	$\bar{D}^*$ ( $\mu\text{m}$ )	0.1505	0.2627	0.430	0.744	1.197
	$N^*$	6.5	4.5	10.0	3.5	5.0

Table 2 Effect of measurement error on calculating results

Assumed value	$\bar{D}$	0.20	0.32	0.54	0.86	1.2	
	$N$	7.7	6.6	3.4	9.7	2.6	
Calculated value	No. 1	$\bar{D}^*$	0.197	0.315	0.545	0.860	1.2
		$N^*$	8.0	6.0	3.5	9.5	2.5
	No. 2	$\bar{D}^*$	0.193	0.323	0.545	0.860	1.2
		$N^*$	8.5	7.0	3.5	9.5	2.5
	No. 3	$\bar{D}^*$	0.193	0.315	0.545	0.861	1.2
		$N^*$	8.5	6.0	3.5	10	2.5

Table 3 Experimental results of submicron sized particles

Sample	Standard particle, $n = 1.2$	$\text{TiO}_2$ , $n = 2.18$	$\text{SiO}_2$ , $n = 1.16$	Dye, $n = 1.3$
Nominal Diameter $D$ ( $\mu\text{m}$ )	0.58	0.71	0.28	0.57
Measured $D_{32}$ ( $\mu\text{m}$ )	0.54	0.69	0.30	0.59
Error (%)	6.90	2.82	7.14	3.51

Table 4 Reproducibility of measurement of  $0.58 \mu\text{m}$  latex sphere

Nominal Diameter $D$ ( $\mu\text{m}$ )	0.58									
Measured $D_{32}$ ( $\mu\text{m}$ )	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10
		0.535	0.536	0.536	0.545	0.535	0.535	0.545	0.545	0.536
Average diameter $D_{32} = 0.538 \mu\text{m}$					Maximal deviation $\Delta = \frac{0.545 - 0.538}{0.538} = 1.3\%$					

## 参 考 文 献

- 1 H. G. Barth, *Modern Methods of Particle Size Analysis*, John Wiley & Sons, New York, 1984, 135~151
- 2 Malvern Ins. Ltd., *Mastersizer Instruction*, England, 1990, 2~10
- 3 Coulter Inc., *LS Series Instruction*, U. S. A., 1992, 1~8
- 4 S. H. Lee, *Optical Information Processing*, Springer-Verlag, Berlin, 1981, 6~15
- 5 A. B. Yu *et al.*, *Powder Technology*, **62**, 101~118(1990)
- 6 陈宝林, *最优化理论与算法*, 清华大学出版社, 1989, 299~333