

减少测粒仪光靶环数提高颗粒尺寸求解速度

郑 刚 虞先煌 陆为建 王乃宁

(上海机械学院仪表学院, 上海 200093)

提要 本文指出当采用函数限制解法求解颗粒尺寸分布时, 仅用光靶上的少数几个环就能确定分布函数, 而且得到与原来(15 个环)相同的可测粒径范围和对颗粒尺寸变化的灵敏度, 文中对此进行了理论分析和计算机模拟计算, 并给出了对标准颗粒的实测结果。

关键词 测粒仪, 光靶环数

Improving the calculating speed of laser particle sizer by reducing the number of photosensitive rings

ZHENG Gang, YU Xianhuang, LU Wei Jiang, WANG Naining

(Shanghai Institute of Mechanical Engineering, Shanghai 200093)

Abstract A method of improving the calculating speed of particle size distribution by reducing the number of photosensitive rings is proposed. Through analysis of light energy distribution diffracted by the particle and its derivation, a new formula of size class is introduced and the minimum of photosensitive rings is obtained. Theoretical analysis and numerical simulation demonstrate that the accuracy and measuring range of particle size with 6 rings is almost the same as those with 15 rings. The method is verified through practical measurements for 8 standard latices. It is very suitable for calculating particle size distribution with model dependent.

Key words particle sizer, number of the photosensitive rings

1 引 言

在光散射测粒技术中, 衍射式激光测粒仪是较早开发并得到成功应用的一种。衍射式测粒仪采用同心半圆环状多元光电探测器(光靶), 通过接收颗粒群衍射的前向小角散射光, 反推出颗粒尺寸信息, 一般光靶上共有 15 个独立的半圆环状探测单元(事实上是 30 个单元, 常将相邻两个并作一个)^[1], 根据各单元的几何半径并结合所用接收透镜的焦距 f , 由式 $x = \pi ds / \lambda f = 1.357$, 确定可测粒径范围和尺寸分档^[1,2], 分档数目与所用光靶单元数目相同。在采用 15 个

环状单元的情况下,对于测粒仪中最常用算法之一的函数限制解法(model dependent),求解一个尺寸分布一般需要几分钟,这一速度不利于目前日趋广泛的在线检测要求^[3,4]。分析函数解法的算法,可以发现,限制这一速度的主要原因是计算目标函数的时间过长,因此若能减少光靶的有效环数,即可缩短目标函数的计算时间,从而提高求解速度。幸好,对函数限制解法而言,一旦确定了分布函数中的两个参数,就可确定颗粒尺寸并任意分档,而与采用光靶上几个探测光环无关。问题是究竟用多少个环单元才能确定分布函数,并同时保证与采用 15 个环单元时有相同的可测粒径范围和测量精度,本文对此进行了研究。

2 理论分析

衍射式激光测粒仪的光学系统如图 1 所示,由颗粒衍射的光能经 Fourier 变换透镜后,被位于其焦面上的圆环状多元光电探测器接收。根据 Fraunhofer 衍射理论,对于一个直径为 D 的球形颗粒,在 Fourier 透镜后焦面即光靶上的光强分布为^[5]

$$I = I_0 \left[\frac{J_1(x)}{x} \right]^2 \tag{1}$$

式中 $x = \pi ds/\lambda f$, I_0 为光靶中心的光强, s 为光靶上的径向半径, f 为 Fourier 透镜的焦距, J_1 是第一类 1 阶 Bessel 函数, λ 为入射光波波长。于是在以光靶中心为圆心, s 为半径的圆域内的光能为

$$E = \int_0^s I(s) 2\pi s ds = 1 - J_0^2(x) - J_1^2(x) \tag{2}$$

式中已令常系数为 1。能量随颗粒尺寸的变化率可利用 Bessel 函数的递推关系和导数公式,通过对式(2)求导得到,即

$$\frac{dE}{dx} = \frac{2}{x} J_1^2(x) \tag{3}$$

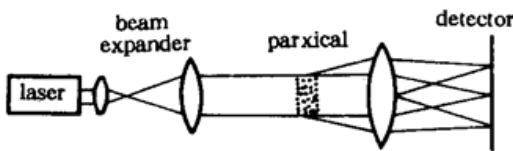


Fig. 1 Schematic diagram of laser particle sizer

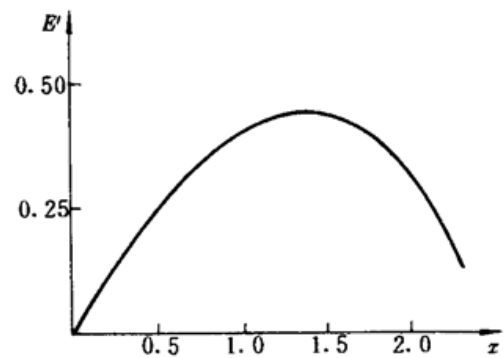


Fig. 2 Derivative of energy as a function of particle size parameter

其曲线如图 2 所示。能量的变化率反映的是颗粒衍射的光能或者说光靶输出的信号随颗粒尺寸变化的灵敏度,变化率越大表明衍射光能对尺寸变化越灵敏,也就是在该点的尺寸分辨率越高。变化率最大的点可由对式(2)求 2 阶导数并令其为零得到,即

$$\frac{d^2E}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left[\frac{2J_1^2(x)}{x} \right] = \frac{J_1(J_0 - 3J_2)}{2x} = 0$$

也就是
上式的根为

$$J_0 - 3J_2 = 0 \tag{4}$$

$$x^0 = \frac{\pi ds}{\lambda f} \approx 1.357 \quad (5)$$

由图 2 可见,该点就是能量变化率最大的极大点,而在该点的变化率为 $E'(1.357) = 0.420$ 。通常就根据式(5),在给定透镜焦距 f 及光靶各环半径 s 的情况下,确定可测粒径范围及进行尺寸分档。但由图 2 可见,变化率曲线在极值点附近比较平坦,事实上对式(3)的数值计算表明,当 $1 \leq x \leq 1.750$ 时,

$$|E'/E'_{\max}| > 91.7\% \quad (6)$$

即当 x 在 $[1, 1.75]$ 区间内时, E' 均几乎达到极值。这说明,在颗粒尺寸分档时, x 可在区间 $[1, 1.75]$ 内任意取值。因此若在确定分档上、下限时用

$$\begin{cases} x_U = \pi ds_1 / \lambda f = 1.75 \\ x_L = \pi ds_2 / \lambda f = 1 \end{cases} \quad (7)$$

代替式(5),将扩大每一档的尺寸范围,换句话说光靶上每一个探测单元能响应比式(5)决定的尺寸区间现更大或更小的颗粒尺寸。表 1,表 2 给出了采用焦距 $f = 63 \text{ mm}$ 的 Fourier 接收透镜及 $\lambda = 0.6328 \text{ }\mu\text{m}$ 时,分别用式(5)及式(7)确定的可测粒径范围和每一档的尺寸区间。从小到大的 15 档尺寸与光靶上半径从大到小的 15 个光环一一对应,每一光环的内外半径决定了对应的每一档的上下限。例如光靶上半径最小的第一个光环响应的颗粒尺寸范围(按式(7))是 $18.5 \sim 52.9 \text{ }\mu\text{m}$,余者类推。分析表 2,不难发现,15 档尺寸中有许多档部分包含在其他档尺寸中,显然,第 1,4,8,11,14,15 共 6 档尺寸已连续地覆盖了整个可测粒径范围,这表明,用光靶上对应的第 15,12,8,5,2,1 共 6 个探测环即可响应从 $0.8 \sim 52.9 \text{ }\mu\text{m}$ 的所有颗粒尺寸,且这一尺寸范围也大于通常的 63 mm 透镜的可测粒径范围(见表 1)。因此,理论上用光靶上的上述 6 个环求颗粒尺寸分布是可行的,且与用 15 个环求尺寸分布的方法有几乎相同的尺寸变化灵敏度和可测范围。需要说明的是,上述结论是对特定的焦距和波长得到的,如果实际所用的透镜焦距及激光波长不同,则应根据式(7),仿照本文步骤具体计算出各档的尺寸,并继而得到覆盖整个测粒范围的最少环数。

Table 1 Size classification (μm)
with formula (5)

| No. of rings | Lower | Upper |
|--------------|-------|-------|
| 1 | 1.1 | 1.4 |
| 2 | 1.4 | 1.8 |
| 3 | 1.8 | 2.2 |
| 4 | 2.2 | 2.7 |
| 5 | 2.7 | 3.2 |
| 6 | 3.2 | 3.9 |
| 7 | 3.9 | 4.6 |
| 8 | 4.6 | 5.5 |
| 9 | 5.5 | 6.6 |
| 10 | 6.6 | 8.0 |
| 11 | 8.0 | 9.9 |
| 12 | 9.9 | 12.7 |
| 13 | 12.7 | 17.0 |
| 14 | 17.0 | 25.1 |
| 15 | 25.1 | 41.0 |

Table 2 Size classification (μm)
with formula (7)

| No. of rings | Lower | Upper |
|--------------|-------|-------|
| 1* | 0.8 | 1.8 |
| 2 | 1.0 | 2.3 |
| 3 | 1.3 | 2.8 |
| 4* | 1.6 | 3.4 |
| 5 | 2.0 | 4.2 |
| 6 | 2.4 | 5.0 |
| 7 | 2.8 | 5.9 |
| 8* | 3.4 | 7.0 |
| 9 | 4.0 | 8.5 |
| 10 | 4.8 | 10.3 |
| 11* | 5.9 | 12.8 |
| 12 | 7.3 | 16.4 |
| 13 | 9.4 | 22.0 |
| 14* | 12.6 | 32.3 |
| 15* | 18.5 | 52.9 |

3 数值模拟及实测结果

为检验用 6 个光环求颗粒尺寸分布方法的可行性和正确性,我们进行了数值模拟计算,计算时假设颗粒尺寸符合 Rosin-Rammler 分布^[1],即设尺寸分布函数为

$$W(D) = \frac{dW}{dD} = N \left(\frac{D^{N-1}}{D^N} \right) \exp \left[- \left(\frac{D}{\bar{D}} \right)^N \right]$$

式中 (\bar{D}, N) 为 2 个待定的常数, \bar{D} 称为尺寸参数, N 称为分布参数。所谓求尺寸分布实际上就是确定 \bar{D}, N 的过程。模拟计算的步骤是:先设定参数 $(\bar{D}, N)^*$,按式^[1,6]

$$E_j = C \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \frac{W(D)}{D} [J_0^2(x_{1,j}) + J_1^2(x_{1,j}) - J_0^2(x_{2,j}) - J_1^2(x_{2,j})] dD \quad j = 1, 2, 5, 8, 12, 15 \quad (8)$$

计算光靶上 6 个环的光能,其中 $x_{1,j} = \pi D s_{1,j} / \lambda f$, $x_{2,j} = \pi D s_{2,j} / \lambda f$, $s_{1,j}, s_{2,j}$ 为光靶上第 j 环的内外半径。将这一组计算的光能作为模拟的被测量 E_j , 然后用优化方法不断调整 (\bar{D}, N) ,使下列目标函数

$$OBF = \sum (E_j - E'_j)^2 \quad j = 1, 2, 5, 8, 12, 15 \quad (9)$$

最小的一组 $(\bar{D}, N)^*$,就是所求的 2 个待定参数,由其决定的函数 $W(D)$ 即为颗粒的尺寸分布函数,上式中 E_j 为计算的光能, E'_j 为实测光能。表 3 给出了按上述步骤所作的部分模拟计算的结果,由表可见,仅用光靶上的上述 6 个环确能给出相当好的反推结果。表 4 给出的是对 8 种标准颗粒分别用 6 个环及 15 个环的实测结果,可见两种方法的测量误差均小于 7%,且用 6 个环的测量误差并不比用 15 个环的测量误差来得明显大。标准颗粒中前 2 种由美国 Coulter 公司生产,后 6 种由核工业部北京第五研究所生产,它们符合 GBWE 标准。表中给出的测量值是颗粒的 Sauter 平均值。实算表明,求解一个尺寸分布,在一台 PC286 微机上约几秒至几十秒,比原来的用 15 个环求尺寸分布的方法快 1 倍以上。此外,需要强调的是,分布函数确定后,可任意对颗粒尺寸进行分档,而不受公式(5)或(7)的限制。

Table 3 Numerical caculating results

| Set value | \bar{D} | 1.53 | 2.1 | 3.4 | 7.62 | 15.5 | 27.34 | 35.3 |
|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-----------|-----------|
| | N | 6.85 | 5.6 | 3.6 | 2.01 | 16.4 | 8.67 | 4.6 |
| Cal. value | \bar{D}^* | 1.52999914 | 2.10000038 | 3.40000094 | 7.61999941 | 15.49999905 | 27.339977 | 35.299992 |
| | N^* | 6.84991312 | 5.59999037 | 3.60000205 | 2.01000023 | 16.40006065 | 8.670046 | 4.600003 |

Table 4 Measurement results for standard latices

| Latices | Nominal dia. (μm) | 15 rings | | 6 rings | |
|---------|--------------------------------|----------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| | | D_{32} (μm) | Error (%) | D_{32} (μm) | Error (%) |
| No. 1 | 1.25 | 1.22 | 1.60 | 1.22 | 1.60 |
| No. 2 | 1.31 | 1.29 | 1.53 | 1.40 | 6.87 |
| No. 3 | 1.98 | 2.09 | 5.56 | 1.96 | 1.01 |
| No. 4 | 3.26 | 3.46 | 6.13 | 3.47 | 6.44 |
| No. 5 | 4.91 | 4.95 | 0.81 | 4.78 | 2.65 |
| No. 6 | 9.88 | 10.20 | 3.24 | 9.75 | 1.32 |
| No. 7 | 16.32 | 16.60 | 1.72 | 15.40 | 5.64 |
| No. 8 | 20.62 | 20.68 | 0.29 | 20.51 | 0.53 |

参 考 文 献

- 1 H. G. Barth; Modern methods of particle size analysis, John Wiley & Sons, New York, 1984, 135~151
- 2 E. D. Hirleman *et al.*, *Opt. Eng.*, **23**(5), 557(1984)
- 3 J. Jager, *Powder Technol.*, **82**, 155~162(1990)
- 4 J. Ulrich *et al.*, *Part. Syst. Charact.*, **7**, 25~29(1990)
- 5 M. 玻恩 *et al.*, 光学原理(上册), 科学出版社, 1978, 517~520
- 6 郑 刚 *et al.*, 仪器仪表学报, **13**(1), 83(1993)

力科光电有限公司向国内外用户致意

力科光电有限公司是经营光电产品为主的专业公司,公司以优质的技术服务,最佳的品质服务于国内外用户,一个电话或一封信,您的需要就得到满足。

力科公司向您提供:

1. 非线性晶体:KTP,ADP,KDP,DKDP,LI,LBO 等和这些晶体制作的二倍频器、三倍频器、四倍频器、Q 开关等;
2. 用于微电子和光电子器件的衬底和外延片(MOCVD 和 MBE);
3. 激光晶体:Nd:YAG, Nd:YVO₄, Nd:YAP, Cr:Mg₂SiO₄, Ti:Al₂O₃;
4. 声光晶体:LN, PbMoO₄, LT, TeO₂, Li₂B₄O₇;
5. 光学材料:CaF₂, BaF₂, MgF₂, NaCl, KBr, KCl;
6. 各种光学调整架,各种光学元件的夹具,激光电源,超微光摄像机, ZJD-003 型激光打孔机,激光图像通讯机, TXK 人体死后时间测定仪,便携式激光痕迹检查仪,便携式多波段激光痕迹检查仪,半导体激光报警器;
7. 提供您在济南的各种服务,如住宿,车票,接待。车票请提前四天电告 831365。力科公司将在全国各地招聘业务员,愿者请来信来电,待遇从优。
8. 力科公司愿与各界同仁通力合作,可为厂矿、企业推销产品,请寄说明书和合作意向。

力科光电有限公司
 济南市七里河路 32 号
 邮 编: 250100
 联系人: 祁建平
 传 真: 0531-837760
 电 话: 0531-831365

上海联系电话: 4701390-207 陈以超
 9534890-262 冯贤平
 传真: (021)9528885
 北京联系电话: 7711177-722 李 港
 传真: 7714088