

文章编号:1002-2082(2009)04-0635-04

光散射法测量颗粒尺寸、浓度的实验研究

肖宏波, 陈刚

(西安工业大学 数理系, 陕西 西安 710032; 东南大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 为了能够准确快速地求解出微米量级颗粒系的尺寸和浓度, 设计了一套基于Fraunhofer衍射, 以线阵CCD为接收器件的实验颗粒测量装置。采用Shifrin积分变换方法, 分析了给定样品颗粒的粒径分布、峰值、平均值和体积浓度。实验结果表明, 与传统的Swithenbank方法采用环形光电管阵列为探测器接收衍射光强来反演颗粒分布方法相比, 该方法不需要知道颗粒粒径上下限, 各粒径区间间隔等预知信息, 而且对粒径、浓度的实验测量值与理论值相差较小, 样品峰值粒径为 $9.8498\ \mu\text{m}$, 与给定峰值的相对误差为 3.432% , 具有较高的测试准确度和较好的测试效果。

关键词: 颗粒尺寸; 体积浓度; Shifrin变换; 线阵CCD

中图分类号: TN249

文献标志码: A

An experimental research on particle size and volume concentration based on light scattering

XIAO Hong-bo¹, CHEN Gang²

(1. Department of Mathematics and Physics, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China;

2. School of Information Scientific and Engineering Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to measure the size and volume concentration of particles of several microns accurately and rapidly, an experimental device was designed with a linear array CCD as detector, based on the Fraunhofer diffraction. The Shifrin-transform method was adopted to analyze the particle size distribution, peak value, and mean size and volume concentration. Compared to the conventional Swithenbank conversion method which adopted the self-scanned photodiode array to achieve particle size distribution, the method doesn't need to have precognition information such as upper and low limit as well as interval separation of the particle, and etc. The agreement has been obtained between theory and experiment. The experimental results show that higher accuracy in the measurement of particle size and volume concentration is achieved.

Key words: particle size; volume concentration; Shifrin inversion; linear array CCD

引言

在微粒测量领域, 有众多的测量方法, 如筛分法、显微镜法、沉降法、电感应法、光学法等^[1]。而在光学法中, 光散射法由于具有测量范围广、准确度高、不接触样品、快速、实时等优点日益受到重视。

自1976年Swithenbank等人发展了基于Fraunhofer衍射以环形光电管阵列为接收器件的粒度分布测量方法以来, 衍射散射得到了广泛的应用^[2]。戴兵、贺安之^[3]提出了用线阵CCD代替环形光电管阵列测量颗粒尺寸分布, 采用Shifrin变换,

收稿日期: 2009-03-18; 修回日期: 2009-05-25

基金项目: 教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NECT-04-0949)

作者简介: 肖宏波(1977-), 男, 陕西铜川人, 西安工业大学数理系助教, 主要研究方向为复杂大气中的波传播与散射。

E-mail: dggxiao@163.com

获得了很好的测量效果。叶茂^[4]模拟了体积浓度和散射光强在前向角度(20°)内的积分之比与颗粒平均粒径之间的关系。Koo 和 Hirleman^[5]系统讨论了 Shifrin 变换的计算方法。但 Swithenbank 衍射法采集数据量少,并且在数值反演过程中,由于反演矩阵为病态,大部分采用模式算法^[1],需要一定的预知信息,如限定最后结果为正,知道待测颗粒的大体分布范围等,从而使数据恢复的可靠性和测量准确度均受到了影响。而采用无模式算法^[6]则存在迭代速度慢、收敛性与稳定性差等问题;相关文献则对平均值和浓度的测量涉及不多。

本文中利用 Shifrin 积分反演变换,采用线阵 CCD 为接收器件,建立了颗粒测量实验系统,进行了实时测量,获得了样品颗粒的粒径分布、峰值并进一步分析了平均值和浓度,并与理论值作了比较,获得了较好的测试准确度和效果。

1 实验原理

当一束单色平行光照射至颗粒群,设 $n(x)$ 表示粒径参量为 x 的颗粒数目,在不相关单散射情况下,在透镜的傅里叶焦平面上,颗粒的衍射光强随衍射角的分布为^[1]

$$I(\theta) = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 F^2 \theta^2} I_0 \int_0^\infty x^2 J_1^2(x\theta) n(x) dx \quad (1)$$

Chin 和 Shifrin 等^[7]求得(1)式逆问题的解为

$$n(x) = - \frac{2\pi F^2 k^2}{x} \int_0^\infty \{ J_1(x\theta) Y_1(x\theta) \theta \cdot \frac{d}{d\theta} \left[\theta^3 \frac{I(\theta)}{I_0} \right] \} d\theta \quad (2)$$

式中: I_0 为平行入射光强; F 为接收透镜焦距; θ 为衍射角; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数; λ 为入射光波长; $x = ka = 2\pi \cdot a/\lambda$ 为颗粒尺寸参量; a 为颗粒半径; J_1 和 Y_1 分别是第一类和第二类的 Bessel 函数。(2)式即为颗粒尺寸分布参量表达式,也称为 Shifrin 积分变换式。

考虑颗粒粒径在空间连续分布, $f(a)$ 为粒径分布函数,则颗粒的总体积 V_P 可以近似写为

$$V_P = \int_0^\infty \frac{4\pi}{3} a^3 f(a) da \quad (3)$$

设 V_T 为采样区域的实际体积,则颗粒的体积浓度为

$$C_v = V_P/V_T = \frac{4\pi}{3} \int_0^\infty a^3 f(a) da / SL \quad (4)$$

式中: S 为激光束的截面面积; L 为光通过被测

介质的有效长度。

将(2)式代入(4)式,经过变换^[4],可以推出体积浓度 C_v

$$C_v = \frac{\lambda F^2}{r^2 L} \int_0^\infty \frac{I(\theta)}{I_0} d\theta \quad (5)$$

式中: r 为入射光束的半径。

从(3)式和(5)式可以看出,在理论上可以通过测量散射光在空间的分布就能够得到颗粒分布和体积浓度。

设颗粒系的总粒子数为 N ,平均直径为 $D_{平均}$,则总体积可以用平均直径表示为

$$V_{总} = N \times 4/3 \times \pi \times (D_{平均}/2)^3 \quad (6)$$

又总体积可用各个粒子体积之和表示为

$$V_{总} = \sum_i n_i \times 4/3 \times \pi \times (d_i/2)^3 \quad (7)$$

式中: n_i 为颗粒系中粒径为 d_i 的颗粒数。

根据(6)式和(7)式相等可以得出平均直径。

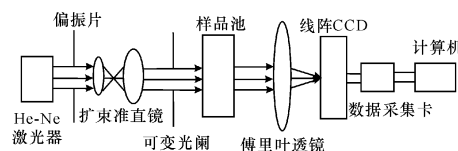


图1 粒径分布测试实验装置图

Fig. 1 The experiment setup for detecting particle size distribution

2 实验装置

图1所示的实验装置中,He-Ne 激光器的功率为 25 mW,波长为 0.632 8 μm ,衰减系统是由 2 片偏振片组成的可调节衰减片,可变光阑的调节范围为(2~29)mm,样品池是 1 cm \times 1 cm \times 4.5 cm 长方体玻璃器皿,CCD 采用的型号为 TCD1501C,采用 ADA11GH-PCI 数据采集卡。实验的样品是由核工业北京化工冶金研究院提供的标准粒子,其标号为 GBW(E) 120004a,其给定的峰值粒径为 9.523 μm ,平均直径为 9.819 μm ,标准偏差为 0.950 μm 。

该装置的测量原理为:He-Ne 激光器发出的光经过一定的衰减,通过扩束准直镜,然后经过可变光阑,将光束直径调整为 8 mm,入射至样品盒,散射及透射的光经过焦距为 140 mm 的傅里叶透镜后,经放置在正前方焦平面上的线阵 CCD 接收光信号并经过相应的电路转化为电信号,通过计算机生成数据 $I(\theta)$ 。

3 实验结果与讨论

取部分样品溶液置于样品池中,进行测量。共测量10次,其散射光强 I (取10次测量的平均值)随像素的关系如图2所示,经数字滤波后的光强如图3所示。

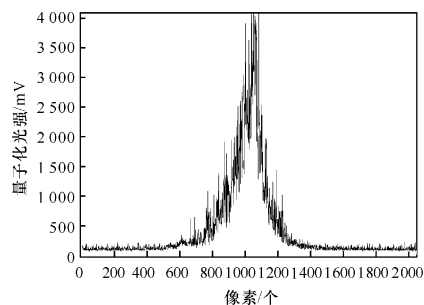


图2 实测平均结果

Fig. 2 Mean result on actual measurement

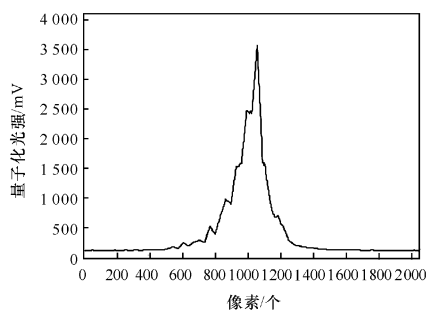


图3 实测滤波结果

Fig. 3 Filter result on actual measurement

实验中所采用的傅里叶透镜焦距为140 mm, CCD像元为 $(7 \times 7 \times 7) \mu\text{m}$,故衍射角间隔为 $\Delta\theta = 7 \mu\text{m}/140 \text{ mm}$,选取前900个像素点,则 $\theta_{\min} = 1 \times \Delta\theta = 5 \times 10^{-5}$, $\theta_{\max} = 900 \times \Delta\theta = 0.045$ 。去掉CCD的本底噪音后,将对应的数值代入(2)式,编程计算出的 $n(x)$ 分布如图4所示。

从图4可以看出,除主峰外,还有一些震荡的小峰(随着粒径的增大,峰值越来越小)。这主要是由于在(2)式中衍射角的积分范围为 $0 \sim \infty$,而本文在实际处理时衍射角采取有限的取值角,造成了数据的丢失。但文献[8]指出,由于这些小峰与主峰相比很小,故可判断为噪音而略去(见图5)。图6为给定的样品颗粒分布图,由图可见,实验曲线与理论曲线比较符合。

经过测量,样品峰值粒径为 $9.8498 \mu\text{m}$,与给定峰值的相对误差为3.432%,具有较高的测量准

确度。

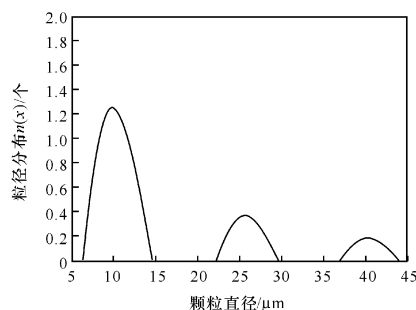


图4 $n(x)$ 与粒径的关系

Fig. 4 Relation between $n(x)$ and particle size

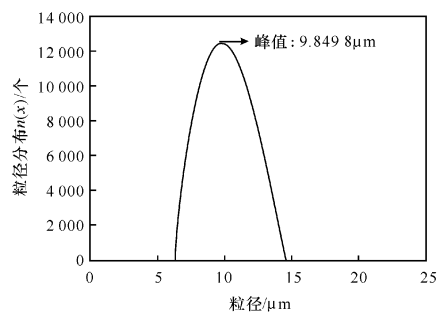


图5 实测值

Fig. 5 Measured value

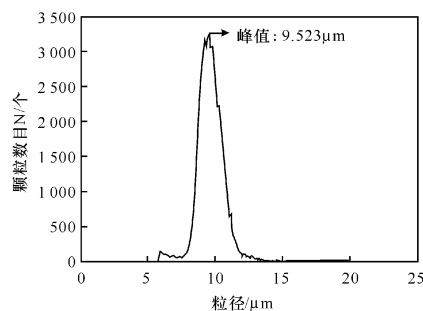


图6 原样品分布

Fig. 6 Original sample distribution

根据图5数据,可得出 $N_{\text{总}} = 3.35 \times 10^6$ 及相应的 n_i 和 d_i ,将其代入(6)式和(7)式,可以得到 $D_{\text{平均}} = 10.467 \mu\text{m}$,与给定的标准值 $9.819 \mu\text{m}$ 相比,其相对误差为

$$\eta = (10.467 - 9.819) / 9.819 = 6.60\%$$

该数值在标准粒子制造商给出的直径偏差范围(10%)之内。

在实验中,入射光束的半径为: $r = 8 \text{ mm}$, $L = 1 \text{ cm}$,代入(5)式,可以得出

$$C_v = \frac{\lambda F^2}{r^2 L} \int_0^\infty \frac{I(\theta)}{I_0} d\theta = 5.2404 \times 10^{-5}$$

其与给定值 (6.11×10^{-5}) 的相对误差为 14.23%。可见, 本方法对体积浓度的测量也是行之有效的。

4 结论

设计了以线阵 CCD 为探测器的颗粒测量装置, 采用 Shifrin 积分变换方法分析了颗粒系的尺寸和浓度。实验结果表明该方法具有以下优点: (1) 测量装置简单, 实用; (2) 预知信息少; (3) 具有较高的测量准确度。当然也存在一些问题, 如出现震荡的小峰, 衍射中心的确定, 衍射角度的选取和仪器本身所产生的噪音等, 有待进一步解决。

参考文献:

- [1] 王乃宁. 颗粒粒径的光学测量技术及应用[M]. 北京: 原子能出版社, 2000.
WANG Nai-ning. Application of laser measuring technology in particle size [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2000. (in Chinese)
- [2] ALLEN T. Particle size measurement [M]. New York: Chapman & Hall, 1990.
- [3] 戴兵, 贺安之. 用线阵 CCD 测量颗粒尺寸分布的研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2002(8): 40-43.
DAI Bing, HE An-zhi. Research of using array CCD for particle-Size distribution measurement [J]. Instrument Technique and Sensor, 2002(8): 40-43. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 叶茂. 两相流颗粒粒径分布及浓度的光散射在线测量方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2000: 70-84.
YE Mao. Light scattering methods for in-situ measuring and concentration in two-phase flow [D]. Nanjing: Southeast University, 2000, 70-84. (in Chinese)
- [5] JOSEPH H K, HIRLEMAN E D. Synthesis of integral transform solutions for the reconstruction of particle-size distributions from forward-scattered light [J]. Applied Optics, 1992, 31(12): 2130-2140.
- [6] BASSINI A, MUSAZZI S, PAGANINI E, et al. Optical particle size based on the chahine inversion scheme [J]. Optical Engineering, 1992, 31(5): 1112-1117.
- [7] ALAIN L F. Analytical inversion in remote sensing of particle size distribution [J]. Applied Optics, 1978, 17(11): 1677-1678.
- [8] ALBERT R, FARRELL P V. Droplet sizing using the shifrin inversion [J]. Journal of Fluids Engineering, 1994, 11(6): 357-362.