

用多波长消光法测量大颗粒的尺寸分布

郑 刚 卫敬明 王乃宁

(上海机械学院仪表学院, 上海 200093)

提 要

基于 Mie 光散射理论, 提出一种用多波长消光原理(light extinction)测量大颗粒的尺寸分布的方法. 理论分析及计算机数值模拟表明, 采用可见光波段的多波长消光法可将测粒上限扩展至 300 μm 以上. 文中给出了数值模拟结果和对几种大尺寸标准颗粒的实测结果.

关键词 大颗粒, 尺寸分布, 消光法.

1 引 言

在众多的颗粒测量方法中, 光散射测粒技术占据着主导地位^[1]. 这一技术一般包括光子相关光谱法、角散射法, 衍射散射法及消光法等几种, 其中消光法(又叫全散射法)在原理和测量装置等方面都十分简单, 易于通过光纤等传光媒质制成结构灵巧的在线式检测仪器. 然而, 以往的消光法测粒技术无论是单波长法^[2]、双波长法^[3]、多波长法^[4]或多对波长法^[5]测颗粒的平均粒径还是用先进的多波长法测颗粒的粒径分布^[6,7], 其测量上限一般仅为几个 μm , 即使是采用红外波段的长波长也不超过 10 μm . 因而大大限制了这一技术在许多重要的工业应用, 如烟窗排烟, 燃气轮机中的烟气检测等场合使用. 为此, 本文分析了消光法测粒技术扩展测量上限的可能性, 在大量数值模拟计算的基础上, 指出采用可见光波段的多波长消光技术能将测粒上限有效地扩展至 300 μm 以上, 对几种大尺寸标准颗粒的实测也证实了这一方法的可行性.

2 测量原理及方法

众所周知, 当一束单色平行光通过悬浮颗粒时, 由于颗粒对入射光的散射和吸收, 出射光强将会受到衰减, 入射光和出射光之间的关系由 Lambert-Beer 定律决定^[8], 即

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \sigma L \quad (1)$$

式中 L 为光通过被测颗粒群时的光程, $\sigma = \frac{\pi}{4} D^2 N K_e(\lambda, m, D)$ 称之为浊度, 其中 D 为颗粒直径, N 为单位体积内的颗粒数, K_e 为消光系数, λ 为入射波长, m 为颗粒相对于周围介质的折射率, K_e 由 Mie 理论确定^[9]. 如果被测颗粒是多分散系的, 设直径为 D_i 的颗粒有 N_i 个(数目浓度), 则(1)式化为

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \frac{\pi}{4} L \sum_{i=1}^k D_i^2 N_i K_e(\lambda, m, D_i) \quad (2)$$

如以颗粒的重量浓度 w_i 表示,即用

$$N_i = \frac{6w_i}{\pi\rho D_i^3} \quad (3)$$

代入(2)式得

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = C \sum_{i=1}^k \frac{w_i}{D_i} k_c(\lambda, m, D_i) \quad (4)$$

式中 C 为常数, ρ 为颗粒的比重, 如果入射光波是由波长为 λ_j 的多个光波组成, 则得一类似于(4)式的方程组

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = C \sum_{i=1}^k \frac{w_i}{D_i} k_c(\lambda_j, m, D_i) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

写成矩阵形式即为

$$AW = E \quad (6)$$

式中 $A = \left[\frac{1}{D_i} k_c(\lambda_j, m, D_i)\right]_{n \times n}$, $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$, $E = \left[\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_1, \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_2, \dots, \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_n\right]^T$, 并忽略(4)式中常数. 类似于 *Malvern* 衍射式激光测粒仪^[10]的做法, 在求解颗粒尺寸分布矩阵 W 时, 可预先将被测颗粒的尺寸区间 $[D_{min}, D_{max}]$ 分为 n 个小区间 $[D_i, D_{i+1}]$, $i = 1, 2, \dots, n-1$, 其中 $D_1 = D_{min}$, $D_n = D_{max}$. 因此 A 矩阵中的各个元素是常数(如 D_i 取各小区间的中点). 也即(6)式是一常数线性方程组, 矩阵 E 的各元素是可测量, 以后称 E 为消光矩阵. 理论上通过对(6)式求反变换, 即可求出分布矩阵 W , 然而, 遗憾的是(6)式是一严重病态的方程组, 采用一般的求线性方程组的算法无法求解. 目前常用的是采用最优化算法, 即建立如下的目标函数

$$OBF = \sum_{j=1}^n (E_j^c - E_j^s)^2 \quad (7)$$

式中 E_j^c 为按(5)式计算的理论消光值, E_j^s 为实测值, 显然使 OBF 最小的一组 W_i , $i = 1, 2, \dots, n$ 就是所求的颗粒尺寸分布.

测粒仪中求解颗粒尺寸分布一般有两种解法^[10]即函数限制解法和独立模式解法. 本文采用函数限制解法, 即假设颗粒尺寸分布符合某一双参数函数关系如正态分布, Rosin-Rammler (R-R)分布等. 现以 R-R 分布为例说明求解方法, R-R 分布的具体表达式是

$$dW(D) = K \left(\frac{D^*}{D}\right)^k \exp\left[-\left(\frac{D}{D^*}\right)^k\right] dD \quad (8)$$

式中的两个参数 (\bar{D}, K) 即为待定的二个常数. 由于 $W_i = \int_{D_i}^{D_{i+1}} dW(D)$, 代入(5)式可从理论上求出一组 $\ln(I_0/I)$, 不断调整 (\bar{D}, K) , 也即改变 W_i 的值, 使 OBF 最小的那一组参数 $(\bar{D}, K)^*$ 就是所求的最佳参数, 由其决定的(8)式就是颗粒满足的尺寸分布函数.

由 Mie 散射理论可知^[9], 当颗粒的尺寸参数 $\alpha = \pi D/\lambda$ 较大时, 消光系数 K_c 趋近于常数 2. 若 $K_c = 2$, 则(5)式变成了线性相关的方程组, 很显然, 此时用多波长消光原理测颗粒尺寸分布的方法将会失效. 因此, 从理论上讲, 消光法的测粒上限决于 K_c 是否等于 2, 由于 K_c 是一复杂的振荡函数, 究竟多大尺寸颗粒的 $K_c = 2$, 须根据 Mie 理论并编制专门的计算程序确定, 关于 K_c 的计算方法可参阅文献[11].

3 数值模拟计算和实测结果

为了解消光系数 K_c 随尺寸参数 α 的变化情况, 对 K_c 取不同的折射率作了大量的计算, 表 1 给出了部分计算结果, 由表 1 可见, K_c 随 α 趋近于 2 的速度与折射率有关, 一般情况下, 即便是

$\alpha = 2000$ (相当于 $D = 382 \mu\text{m}$, 取 $\lambda = 0.6 \mu\text{m}$) 这样的大颗粒, K_e 与 2 之间的差别也还是明显的. 表 2 是用 Powell 最优化算法^[12]所做的模拟计算结果, 即先设定尺寸分布函数中的两个参数 (\bar{D}, K) , 然后按(5)式计算出一组 $\ln(I_0/I)$, 将这一组理论消光值作为被测值, 通过优化算法再反演出两个参数 $(\bar{D}, K)^*$, 计算时在可见光波段 $0.40 \mu\text{m} \sim 0.80 \mu\text{m}$ 范围内取 15 个波长. 由表 2 可见, 对不同的折射率, 反演的两个参数与设定的两个参数均相当吻合. 表 3 则模拟了测量误差对计算结果的影响, 其中 No. 1 是在第 14 个波长处(长波方向)对 I_0/I 加上 1% 的相对测量误差后所得的反演结果, No. 2 是在第 14、第 10 波长处对 I_0/I 加上 1% 的测量误差, No. 3 是在第 14、第 10、第 6 波长处加 1% 的测量误差. 表 3 表明, 在 I_0/I 有 1% 的测量误差的情况下, 反演的 $(\bar{D}, K)^*$ 仍有较高的精度, 事实上 1% 的误差已相当大, 这一误差相当于 12 位 A/D 转换器的 50 个量化单位. 表 2、表 3 的计算表明, 用多波长消光法测大尺寸颗粒的尺寸分布是完全可行

Table 1 Calculating results of extinction coefficient K_e

size parameter α	500			1000			2000			
refractive index m	1.2	1.5	2.0	1.2	1.5	2.0	1.1	1.2	1.5	2.0
extinction coefficient	2.0529	2.0426	2.0111	2.0291	2.0139	2.0113	2.0225	2.0082	2.0099	2.0129

Table 2 Numerical simulating results of large particles

refractive index m		1.2			1.5			2.1		
set val.	\bar{D} (μm)	80.6	200.3	310.8	70.1	202.7	315.4	45.0	184.9	313.7
	K	12.7	2.4	5.2	3.2	6.8	4.6	9.0	17.2	8.3
cal. val.	\bar{D}^* (μm)	80.6006	200.300	310.8029	70.1000	202.7000	315.4000	45.0000	184.9000	313.7000
	K^*	12.7004	2.4000	5.1999	3.2000	6.8000	4.6000	9.0000	17.2000	8.3000

Table 3 The effect of measurement error on calculating results

set value		\bar{D} (μm)	30.5	60.3	100.0	205.8	300.0
		K	4.5	7.4	10.6	3.3	11.7
cal. value	No. 1	\bar{D}^* (μm)	30.697	60.835	99.814	208.685	295.417
		K^*	4.669	7.179	9.711	3.498	11.814
	No. 2	\bar{D}^* (μm)	30.764	59.992	100.105	199.285	297.954
		K^*	4.739	7.068	9.771	3.661	10.897
	No. 3	\bar{D}^* (μm)	30.659	60.040	99.249	208.728	298.812
		K^*	4.642	7.179	10.241	3.301	10.510

Table 4. Measurement results of latex spheres

latex spheres				
nominal diameter	5.06	16.320	20.62	74.96
measurements D_{32}	4.86	16.318	19.01	72.45
relative error (%)	3.95	0.01	7.81	3.35

Table 5. Repeat measurements of 5.06 μm latex sphere

latex	5.06 μm				
measurements	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
D_{32}	4.87	4.85	4.85	4.86	4.86
average value $D_{32}=4.86$	maximum repeat error $\Delta_{\text{max}} = \frac{0.01}{4.86} = 0.2\%$				

的,且最大可测粒径的上限大于 300 μm . 表 4 是用本文方法对 4 种标准颗粒的实测结果(表中给出的是 Sauter 平均直径,实际可输出由(8)式决定的尺寸分布),可见实测值与名义值的相对偏差小于 10%. 表 5 则是对 5.06 μm 标准颗粒的 5 次重复测量结果,可见重复测量的最大相对偏差小于 0.5%. 实验所用的标准颗粒由核工业部北京第五研究所生产. 它们符合国家标准 GBWE.

4 讨论与结论

- 1) 本文采用可见光波段的多波长消光测粒技术,用函数限制解法测大颗粒的尺寸分布,最大可测粒径大于 300 μm ,如采用独立模式算法^[7],则可测量多峰分布的颗粒系. 在可见光波段选多个波长的优点是避免物质在红外或紫外波段的吸收问题.
- 2) 当颗粒尺寸分档区间确定之后(一般来说可任意分档),即可决定(6)式的系数矩阵. 在实际计算时,可预先求出该矩阵并存贮,用这种方法能极为有效地缩短计算时间. 例如,如果测量系统用 15 个波长,即(6)式是一个 15 阶的方程组,则在一台 PC 286 微机上,计算一个尺寸分布仅需 1~2 分钟,显然方程(6)的阶数越低,计算所需的时间将越短.
- 3) 本文是通过测量各个波长下的消光比 (I_0/I) 来求出颗粒尺寸信息的,因此在两次测量光强 I_0 及 I 期间,光源的稳定性至关重要,须采用纹波很小的大功率稳压器件作照明电源.

本文提出的多波长消光法测大颗粒的尺寸分布是对消光测量技术的重要补充和发展,从而大大拓宽了这一方法的测量范围和应用领域. 由于消光法测粒原理和结构简单,且采用白光光源,便于用光纤作导光媒质,因此特别适合于工业上越来越多的在线检测的需要.

参 考 文 献

- [1] H. G. Barth, S. T. Sun, Particle size analysis. *Analytical chemistry*, 1991, **63**(12): 1R~10R
- [2] W. Schock, Ed. S. Masuda, On-line measurement of average particle diameter with MESA. *Proceedings of the 3rd International Aerosol Conference*, Kyoto: Pergamon Press, 1990: 655~658

- [3] Wang Naining, Wei Jingming, Ed. T. Ariman, *Total scattering technique for particle measurements*. Hemisphere, Particulate and Multiphase process, 1987: 136~139
- [4] E. E. Uthe, Particle size evaluations using multiwavelength extinction measurements, *Appl. Opt.* 1982, 21(3): 454~459
- [5] 卫敬明, 张志伟, 王乃宁, 用光散射法测量饱和蒸汽的湿度. *工程热物理论*, 1989, 10(2): 196~199
- [6] D. L. H. Hutt, Measurement of the droplet size distribution of fog using multi-wavelength lidar: a feasibility study. *J. Aerosol Sci.*, 1988, 19(7): 833~836
- [7] 蔡小舒, 王乃宁, 光全散射对法测量微粒尺寸分布的研究. *光学学报*, 1991, 11(11): 1049~1054
- [8] V. J. Novick, Use of series light extinction cells to determine aerosol number concentration. *Aerosol Science and Technology*, 1988, (9): 251~262
- [9] M. Kerker, *The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation*. New York: Academic, 1969
- [10] H. G. Barth, *Modern Methods of Particle Size Analysis*, New York: John Wiley & Sons, 1984, 135~172
- [11] 郑 刚, 蔡小舒, 王乃宁, Mie 散时的数值计算. *应用激光*, 1992, 12(5)
- [12] 陈宝林, 最优化理论与算法. 北京: 清华大学出版社, 1989: 299~333

Determination of size distribution of large particle using multi-wavelength light extinction

ZHENG Gang WUI Jingming WANG Naining

(Department of Instruments, Shanghai Institute of Mechanical Engineering, Shanghai 200093)

(Received 22 May 1992; revised 27 July 1992)

Abstract

Based on Mie's light scattering theory, a method to determine the size distribution of large particles using multi-wavelength light extinction is proposed in this paper. Theoretical analysis and numerical calculations show that the method using multi-wavelength extinction at wavelength between 0.4 μm -0.8 μm can expand the upper limit of particle measurement to 300 μm . Numerical simulation results and measurement results of monodisperse polystyrene latex spheres as standard reference material are also given in the paper.

Key words large particle, size distribution, light extinction.