

液滴微粒直径分布的激光散射法测量

胡柱国

盛德仁

(西安交通大学物理系)

(西安交通大学能源系)

提 要

本文利用氦氖激光器为光源在自行设计的光散射实验装置上对球形微粒群进行了粒径平均直径及直径分布的理论研究和测量。实验结果表明,本实验装置具有测量精度高、适用范围广和测量粒径范围宽等特点。

关键词: 物理光学, 吸收与散射。

一、前 言

微粒的大小直接影响工业流程、产品质量以及能源的消耗和生产过程的安全性。怎样准确方便地检测液滴微粒的直径及直径的分布规律,成为当前一个引人注目的技术问题。例如,在蒸汽透平中湿蒸汽是以水珠弥散在蒸汽中的弥散体形式存在的,它严重侵蚀透平叶片,影响透平的安全性,降低透平的效率;通过检测水珠的平均直径以及直径的分布规律,可以说明不同直径的水珠对透平叶片的危害是有所不同的。在燃烧动力装置中,燃料雾化微粒的粒度及其分布情况直接影响点火、火焰稳定性、燃烧的完全度等燃烧特性。在化学、医药、机械、冶金、动力、电子、轻工、建筑及环保等部门都存在着大量液滴微粒直径有关的技术问题,需要准确测定液滴微粒的直径和直径分布。

二、液滴微粒的散射法测量原理

具有某一尺寸范围的微粒所组成的多尺寸弥散体系统,期望通过微粒的散射光强分布值以求得微粒的平均直径,通常采用统计方法,即选择一个能够合理地描述微粒系统尺寸分布规律的分布函数 $f(\alpha)$ 。用来表示所研究的微粒群在某一尺寸区间范围内微粒出现的数目,

$$f(\alpha) = \frac{dn}{d\alpha}, \quad (1)$$

式中 α 是微粒的无因次直径, n 为单位体积内微粒的个数。

描述液滴微粒的直径分布最常见的是用正态分布,但在实际液滴微粒系统中,往往是偏离正态分布的^[1]。Mugele和Evans^[2]提出了上限分布函数的表达式,认为上限分布函数广泛地适用于雾滴、乳胶和气悬体等。尤其适用于精确计算各种平均直径,其表达式可改写为

$$f(\alpha) = \frac{O \exp \left\{ - \left[\delta \left(\ln \frac{\alpha \alpha_{\max}}{\alpha_{\max} - \alpha} \right) \right]^2 \right\}}{\alpha^4 (\alpha_{\max} - \alpha)}, \quad (2)$$

$$O = \frac{\delta \cdot \alpha_{\max}^4}{[1 + 3\alpha \exp(1/4\delta^2) + 3\alpha^2 \exp(1/\delta^2) + \alpha^3 \exp(9/4\delta^2)] \sqrt{\pi}}, \quad (3)$$

式中 O 由 (3) 式归一化条件给出, α, δ 为上限分布特征参数, α 为微粒无因次直径, α_{\max} 为 α 的最大尺度。

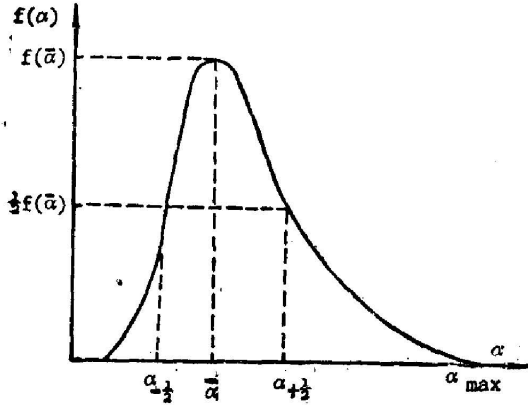


Fig. 1 The curve of upper-limit distribution function

因为上限分布特征参数 α, δ 没有直接的几何意义, 故更多使用另外两个具有直接几何意义的参数——模态尺寸 $\bar{\alpha}$ 和分布宽度 Q , 如图 1 所示。规定其分布函数的半峰值所对应的 α 值, 大者为 $\alpha_{+\frac{1}{2}}$ 、小者为 $\alpha_{-\frac{1}{2}}$ 。这样, 分布宽度 Q 被定义为

$$Q = \frac{\alpha_{+\frac{1}{2}} - \alpha_{-\frac{1}{2}}}{\bar{\alpha}}. \quad (4)$$

当 $\alpha = \bar{\alpha}$ 时, 分布函数 $f(\alpha)$ 的导数为零, 从而可以得到

$$a = \left(\frac{\alpha_{\max}^3}{\bar{\alpha}} - 1 \right) \exp \left[\left(\frac{1}{\delta^2} \right) \left(2.5 \frac{\bar{\alpha}}{\alpha_{\max}} - 2 \right) \right], \quad (5)$$

由半峰值的关系, 又得到方程

$$\left(\frac{\alpha_{\pm\frac{1}{2}}}{\bar{\alpha}} \right)^4 \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\pm\frac{1}{2}}}{\alpha_{\max} - \alpha} - 2 \exp \left\{ -\delta^2 \left[\left(\ln \frac{\alpha \alpha_{\pm\frac{1}{2}}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\pm\frac{1}{2}}} \right)^2 - \left(\ln \frac{\bar{\alpha} \alpha}{\alpha_{\max} - \bar{\alpha}} \right)^2 \right] \right\} = 0. \quad (6)$$

这样, 如果知道 $\bar{\alpha}, Q$ 和 α_{\max} , 通过 (4) ~ (6) 联立式求解非线性方程组, 便可求得 a 和 δ , 从而就可以确定上限分布函数。

在一些两相流动和传热过程的研究中, 常需要知道各种平均直径。其中 Sauter 平均直径 D_{32} 的应用最为广泛, 它适用于既与总面积有关又与总体积有关的问题中。 D_{32} 被定义为

$$D_{32} = \frac{\sum N D^3}{\sum N D^2}, \quad (7)$$

式中 N 为单位体积内的液滴微粒数目。同样, 也可以用无因次直径来定义平均直径。当微粒直径的分布函数为一定时, 平均直径也可以求得。应用 (2) 式上限分布函数, 则

$$\alpha_{32} = \frac{\int_0^{\alpha_{\max}} f(\alpha) \alpha^3 d\alpha}{\int_0^{\alpha_{\max}} f(\alpha) \alpha^2 d\alpha} = \frac{\alpha_{\max}}{1 + a \exp(1/4\delta^2)}. \quad (8)$$

结合米(Mie)散射理论, 应用光散射法测量液滴微粒群的平均直径及其直径分布。对于低浓度的湿蒸汽(光的透射率在 20% 以上)是可行的, 因为这时可略去二次以上的多重光散射的影响, 满足了不相关散射即单散射的条件。那时, 多尺寸弥散体微粒总的散射光强便等于各单个球形微粒散射光强的线性叠加, 即

$$I_p(\theta) = \int_0^{\alpha_{\max}} I(\theta, m, \alpha) f(\alpha) d\alpha, \quad (9)$$

式中 $f(\alpha)$ 为弥散体的分布函数, $I(\theta, m, \alpha)$ 是以 α, m, θ 为参变量的微粒的散射光强函数, 它可以根据米(Mie)公式^[3~5]求得; $I_m(\theta)$ 为多尺寸弥散体微粒的总散射光强度。

利用光电探测器检测多尺寸弥散体微粒的总散射光强, 就可以利用式(9)确定被测的多尺寸弥散体微粒的直径分布函数。具体方法是这样的: 假定被测量的液滴微粒系统其直径分布满足上限分布函数规律。给定上限分布函数的分布参数初值: 模态尺寸 $\bar{\alpha}_0$, 分布宽度 Q_0 和最大微粒直径 $(\alpha_{\max})_0$, 通过(4)~(6)式的非线性组求其他两个分布特征参数初值 a_0 和 S_0 , 由(9)式计算总散射光强的分布值, 并和通过实验检测得到的光强分布值比较, 构成一个目标函数, 利用有约束条件最优化方法处理, 使得计算得到的散射光强和实验检测得到的光强之差的平方和达到最小。得到满足优化条件的上限分布特征参数 $a_{\text{opt}}, \delta_{\text{opt}}$ 和 $(\alpha_{\max})_{\text{opt}}$ 。这就是要测量的液滴微粒的直径分布函数。并由(8)式求平均直径, 其计算程序框图如图2所示。

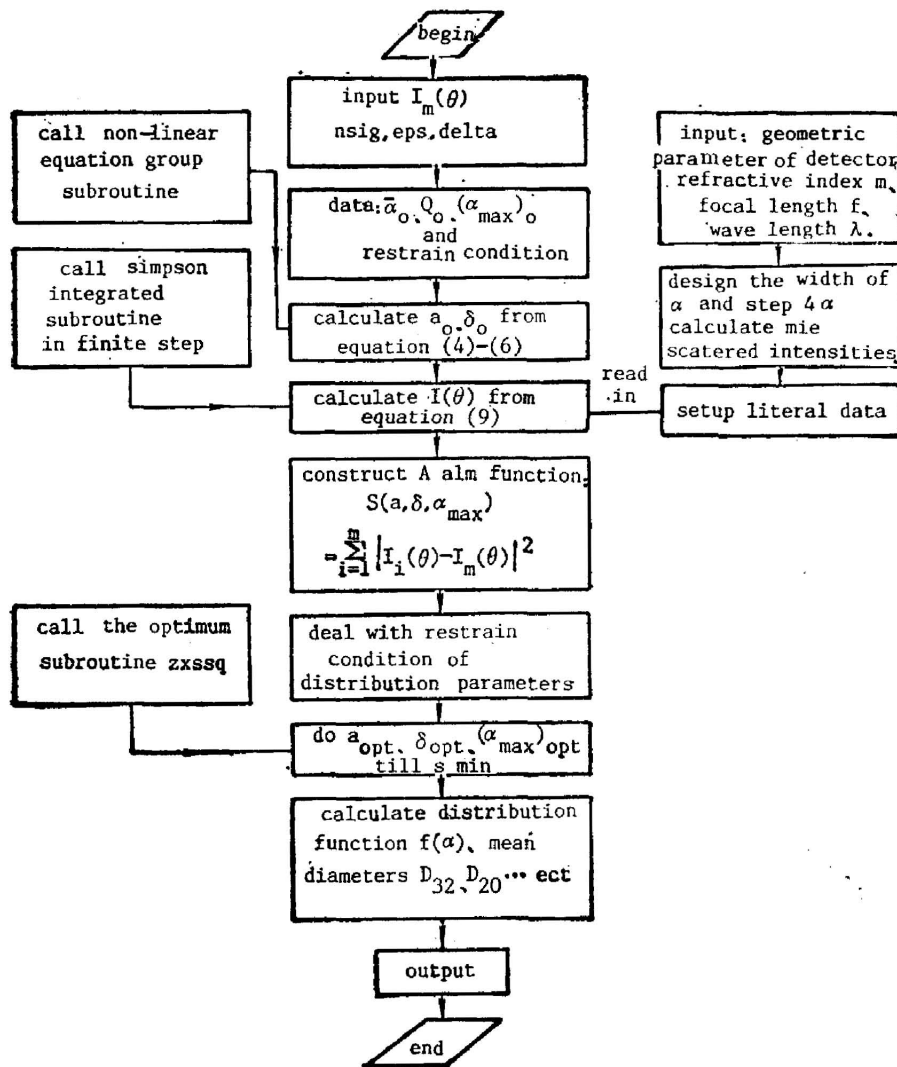


Fig. 2 Schematic of program PD about droplet diameter distribution

三、实验装置

光散射法测量液滴微粒直径分布的实验原理示意图如图 3 所示。样品槽*内微粒所散射的光能量由傅里叶变换透镜 7 所收集,处在透镜后焦面上的 32 环光电探测器阵列 8 接收到散射光能量,在微电流计上采集总散射光强的分布值,输入到计算机作优化处理,得到被测液滴微粒的直径分布与平均直径。

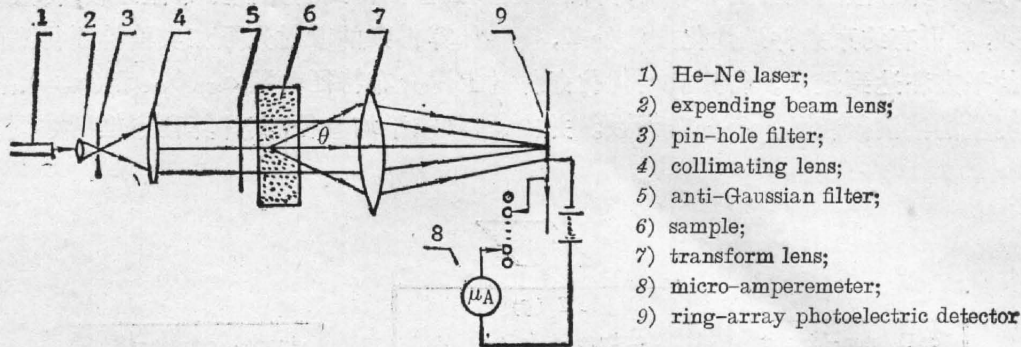


Fig. 3 Schematic of using laser scattering method to measure particle diameter distribution

考虑到激光束横截面的光强度是呈高斯分布,会影响测量精度。故用全息干板制作了一个反高斯膜片,把它置于光路中能起到反高斯滤波器的作用。

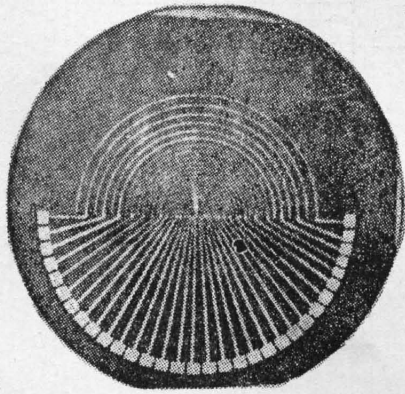


Fig. 4 Photograph of ring-array photoelectric detector

傅里叶透镜收集被测微粒的散射光能量,实际上是把每个微粒的散射光波的空间频率变换成为透镜后焦面上的散射光波的频谱。然后用光电阵列探测器采集散射光的频谱(光强分布值)。本装置采用焦距为 316 mm、有效孔径为 60 mm ($\phi 100$ mm) 的变换透镜。

光电探测器阵列设计成 32 个同心半圆环,如图 4 所示。每个圆环是互相独立的半导体光电探测器,最外环半径为 15.8 mm,环面积为 57 mm²,最内环半径为 0.245 mm,环面积为 0.08 mm²;对应于透镜焦距 $f=316$ mm,可探测到最大散射角为 2.8°,最外环对应散射角的变化量 $\Delta\theta=0.23^\circ$,最内环则对应 0.02°。对光电探测器阵列的每环经过特性测量,每环噪声电流小于 0.1 μ A,光照功率在 2.5 mW 之内,探测器每环输出信号电流与光照功率成线性关系。这些实测数据表明:设计制作的 32 环光电探测器具有良好的工作性能。

四、对水中玻璃微珠的标定性测量及光散射实验测量

用大约 250 目的玻璃微珠对本实验装置作标定性测量。玻璃微珠的折射率为 1.53,置

* 样品槽前后是研磨后光洁度很高的光学玻璃片。

于水中的相对折射率为 1.15。

放大 63× 显微摄影,再用放大倍数为 20× 的图像投影仪放大,按直径间隔 $\Delta D=5 \mu\text{m}$ 逐个测量其直径,统计出玻璃微珠的长方图,如图 5 中的实线长方框图,和各种定义下的平均直径 $D_{32}=43.47 \mu\text{m}$, $D_{31}=41.98 \mu\text{m}$, $D_{30}=40.20 \mu\text{m}$, $D_{21}=40.54 \mu\text{m}$, $D_{20}=38.66 \mu\text{m}$, $D_{10}=36.86 \mu\text{m}$ 。统计 3000 个玻璃微珠,能保证统计得到的直径分布的相对误差在 0.5% 以内。

实验测量时,取 0.1g 的玻璃微珠放入样品槽内,不断搅拌,测量每环输出的信号电流,把测量值减去背景噪音电流值,并作单位面积响应率的修正,得到散射光强相对分布值。输入计算机作优化计算处理,程序框图如图 2 所示。

计算过程中一些具体参数是这样给定的:先给定玻璃微珠的直径范围 $D=0\sim 200 \mu\text{m}$,则 $\alpha=0\sim 1000$,它作为(9)式的积分上下限。用定步长辛普森求积公式计算,积分步长取 $\Delta D=1 \mu\text{m}(\Delta\alpha=5)$,计算光电探测器每环对应的散射光强分布值系数,存入数据文件。选取上限分布函数的初值:分布宽度 $Q_0=0.8$,模态尺寸 $\bar{\alpha}_0=200$,最大无因次直径 $(\alpha_{\text{max}})_0=700$ 。优化程序中满足优化条件的收敛准则为: $\text{NSIG}=3$, $\text{EPS}=10^{-8}$, $\text{DELTA}=10^{-8}$ 。分布函数中分布参数的约束条件为

$$0.2 \leq \alpha \leq 10, \quad 0.2 \leq \delta \leq 10, \quad 200 \leq \alpha_{\text{max}} \leq 1000。$$

测量平均直径数据列于表 1 中。图 5 中曲线是本实验装置所测量得到的直径分布图。测量结果与显微摄影统计测量值吻合很好,平均直径的相对误差不超过 10%,并且测量数据的重复性良好。

为了作更多的比较,在 Malvern 2600/3600 型精度仪上对同一种型号玻璃微珠进行测

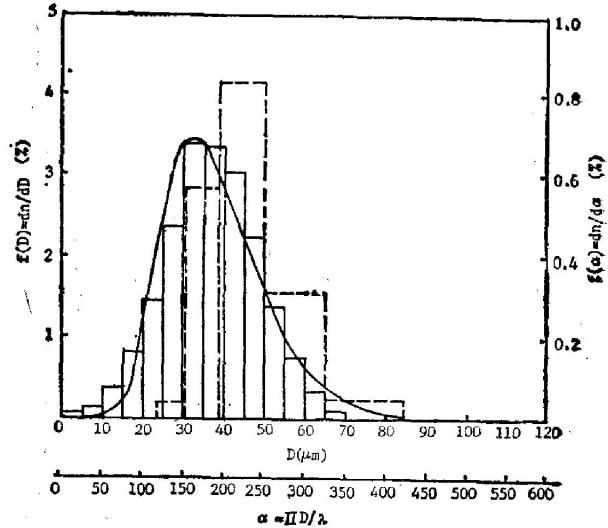


Fig. 5 Diameter distribution of small glass beads

Real step diagrams: The statistic values of microphotograph;

Dashed step diagrams: The results of Malvern instrument 2600/3600;

Curved diagram: The measured results of experiment

Table 1 Measuring result of small glass beads mean diameters (μm)

mean diameters measurement		D_{32}	D_{31}	D_{30}	D_{21}	D_{20}	D_{10}	
Statistics of microphotograph counting		43.47	41.98	40.20	40.54	38.66	36.86	
Malvern 2600/3600		48.85						
Laser scattering method	measuring times	I	47.28	44.96	42.71	42.75	40.59	38.54
		II	42.95	39.59	36.35	36.49	33.44	30.65
	mean values	40.94	38.80	36.61	36.77	34.62	32.60	
		43.72	41.12	38.56	38.67	36.21	33.93	
The error(%) of comparing laser scattering with microphotograph counting		0.58	2.05	4.08	4.61	6.34	7.95	

量。图 5 中的虚线长方图是 Malvern 仪的测量结果*。测得的平均直径 $D_{32} = 48.85 \mu\text{m}$, 同时也列在表 1 中。可以看出, Malvern 仪测得的结果与显微统计的结果相差较大。

五、结 论

(1) 基于米理论的激光散射法测量液滴微粒直径分布的测量装置应用范围很广, 能检测各种成分的液滴微粒, 例如水滴、油雾等; 测量直径的范围宽。本装置中应用的透镜, 焦距为 316 mm, 能检测的直径范围为 $5 \sim 200 \mu\text{m}$ 。如果配备一组不同焦距的透镜组, 就能把测量范围扩大到 $0.02 \sim 1000 \mu\text{m}$ ^[6,7]。选用不同焦距的透镜, 可用于检测各种微粒的直径的范围^[6]。

(2) Malvern 粒度仪在测量相对折射率接近于 1 的微粒时, 会产生较大的误差。这主要是由于该仪器应用夫琅和费衍射理论模型设计所引起的。

参 考 文 献

- [1] 蔡颐年, 王乃宁; 《湿蒸汽两相流》, (西安交通大学出版社, 1985), 第五章 5.2 节。
- [2] R. A. Mugele, H. D. Evans; *Ind. Eng. Chem.*, 1951, **43**, No. 6, 1317~1324.
- [3] H. C. Van de Hulst; *Light Scattering by Small Particles*, (John Wiley & Sons, New York, 1957), 121~130.
- [4] B. Craig, R. H. Donald; *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, (John Wiley & Sons, New York, 1983), 83~101.
- [5] 顾冠亮, 王乃宁; 《上海机械学院学报》, 1984, **5**, No. 4, 21~31.
- [6] G. B. Howard; *Modern Method of Particle Size Analysis*, (John Wiley & Sons, New York, 1984), 142~149.
- [7] J. Swithenbank *et al.*; *AIChE Paper*, 1976, No. 76~69 (Jan), 6~8.

* Malvern 仪输出的结果是按重量分布型式, 把数据转换成数目分布型式画在图 5 中。

Measurement of droplet diameter distribution by laser scattering method

HU ZHUGUO

(Department of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an)

SHENG DEREN

(Department of Energy Source, Xi'an Jiaotong University, Xi'an)

(Received 10 September 1988; revised 24 April 1989)

Abstract

Theoretical researches and measurement of the mean diameter and the diameter distribution of particles, such as low-concentration water droplets appearing in wet steam turbines, have been done by using an optical measurement apparatus with a He-Ne laser developed by the authors. In the design of experimental system, an anti-Gaussian filter is used to eliminate the effect of Gaussian beam and also a Fourier Transformation lens of high precision is applied to eliminate the spherical aberration. In addition, a photosensitive detector is manufactured. By means of these three devices it is possible to greatly increase the measurement accuracy. This apparatus is calibrated by directly measuring diameters of glass beads suspended in water. The results are compared with those obtained by microphotographic statistical method and with those obtained by using a Malvern instrument. The experimental results indicate that this light scattering apparatus is characterized by high precision, wide application area and broad measurement range of particle size ($5 \sim 200 \mu\text{m}$).

Key words: physical optics; absorption and scattering.