

激光角散射诊断气固两相流粒度及浓度的研究

盛德仁

(浙江大学能源系 杭州 310027)

摘要: 根据 Mie 散射理论, 论述了气固两相流颗粒相粒度分布和平均浓度测量的基本原理和试验方法, 利用氧化铝粉末气固两相自由射流试验台, 进行了一系列实际测量。

关键词: 光散射 粒度测量 气固两相流

Research on evaluation of air-solid two-phase particle distribution and mean concentration by laser scattering

Sheng Deren

(Department of Energy, Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

Abstract: Based on Mie scattering theory, the basic principle and test method to evaluate air-solid two-phase particle distribution and mean concentration is presented. A series of experiments have been made to prove the theory with the powder of aluminum oxide in an air-particle free jet.

Key words: light scattering particle size measurement air-solid two-phase

引 言

生产、生活中必需的动力,如电能、热能,主要来自燃料的燃烧。在我国能源构成中,煤占70%以上,预期在相当长的时期内,煤仍将是我国主要的一次能源。煤炭燃烧造成的大气污染,以烟囱粉尘颗粒污染最为严重。我国每年向大气中排放污染物 $4300 \times 10^4 \text{t}$,其中烟尘颗粒约 $2000 \times 10^4 \text{t}$ 以上。因此,研究煤炭的洁净燃烧技术、研制高效除尘净化装置,是解决当前大气污染的当务之急;与此同时,必须研究高效、准确的在线监测工业粉尘排放(特别是在线监测诸如发电厂、钢铁厂、化工厂等大烟囱粉尘排放)的理论和先进的监测技术。烟尘颗粒排放的在线监测,能实时检测污染源排放是否符合现行国家排放标准,能正确评价除尘净化装置及污染防治设施的性能,监督防污设施的使用情况,为环境质量管理与评价提供科学准确的依据。

汽轮机运行中,尤其是在核电站中的汽轮机运行中,遇到的湿蒸气是典型的微细水滴在蒸气中的多尺寸弥散体。汽轮机内部的湿蒸气流动为高速、非定常、三元的复杂流动。湿蒸气中的大量水滴运动,撞击汽轮机叶片,甚至发生叶片断裂,严重影响机组的安全、经济运行。在理论建模分析汽轮机内部湿蒸气两相流中的水滴的成核、生长、运动、撞击、撕裂等机理的同时,需研究湿蒸气两相流的物性测量理论和测量技术。

随着激光技术的发展,光学测量方法得到迅速推广,包括全息法、光相关法、消光法、光衍射法、光散射法等,其中,光散射法是按 Mie 散射原理,通过测量不同散射角下微粒的散射光强分布,确定被测微粒的粒径及分布的测量方法,其测量范围宽、精度高,在很多领域得到应用。但这些应用都基于一个单散射假设,即:每一个被测微粒都暴露于原始入射光之中,对原

始入射光进行散射,这个假设对于较低浓度的两相流微粒相的测量是成立的。如果当被测微粒相浓度较高时,应考虑多重散射效应^[1]。

1 测量原理

根据 Mie 散射理论,微粒在入射光照射时,其散射光强取决于入射光的光强、波长和偏振度、微粒的粒径、相对折射率及散射角,Mie 理论可用数值方法求解,计算结果表明:当入射光、散射角、相对折射率一定时,散射光强随散射微粒直径增大而呈轻微振荡上升趋势。测量得到空间某一立体角范围散射光通量与被测微粒的直径之间的对应关系称为响应函数,当粒子无因次直径 $\alpha = \pi D/\lambda > 10$,即入射光波长 $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$,对应粒子直径 $d > 2\mu\text{m}$ 时,响应函数与微粒直径的平方关系吻合,并且在向前散射时受微粒相对折射率变化的影响很小^[2,3]。这样,根据检测的散射光响应函数就能分析被测粒子的直径分布。

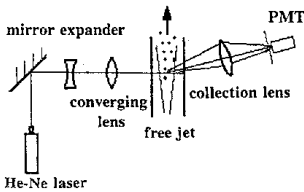


Fig. 1 Scheme of optical system

图 1 为光学系统布置图,由 He-Ne 激光器发出的激光束,经扩束会聚,在激光束腰处形成一个测量区。当被测粒子通过测量区时,产生一个散射脉冲信号,在前向经接收透镜组接收。在后焦平面上会聚,光电倍增管把光信号转换放大成电脉冲信号。

因激光束是典型高斯光束,在测量区入射光强显高斯分布。另外,接收透镜光与入射光之间构成的测量区是不规则的空间区域。由于上述原因,造成脉冲信号峰值不但包含被散射粒子大小的信息,也渗杂着微粒穿过测量区域不同轨迹的信息。因此,采用重叠合法来消除轨迹和光强不匀的影响。

用矩阵形方程求解^[4]:

$$[C] = u \cdot [\Delta S] \cdot [N] \quad (1)$$

式中, u 为粒子运动速度; $C(\bar{A}_i) = C_i$ 为信号峰值在 \bar{A}_i 到 $\bar{A}_i + \Delta\bar{A}_i$ 范围内的计数率; $N(\bar{F}_j) = N_j$ 为响应函数在 \bar{F}_j 到 $\bar{F}_j + \Delta\bar{F}_j$ 范围内的颗粒浓度(数密度); $\Delta S(\bar{A}_i, \bar{F}_j) = \Delta S_{ij}$ 为响应函数为 \bar{F}_j 到 $\bar{F}_j + \Delta\bar{F}_j$ 产生 \bar{A}_i 到 $\bar{A}_i + \Delta\bar{A}_i$ 信号峰值、垂直于流动方向的测量区横截面积。由于第 j 档响应函数 \bar{F}_j 的粒子不可能产生大于 \bar{A}_i 的脉冲峰值信号。故当 $i > j$ 时,截面矩阵 $[\Delta S]$ 的元素均为 0。则(1)式可写成:

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_i \\ \vdots \\ c_m \end{bmatrix} = u \begin{bmatrix} \Delta S_{11} & \Delta S_{12} & \dots & \Delta S_{1i} & \dots & \Delta S_{1m} \\ 0 & \Delta S_{22} & \dots & \Delta S_{2i} & \dots & \Delta S_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \Delta S_{ii} & \dots & \Delta S_{im} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & \Delta S_{mm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_i \\ \vdots \\ N_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

$[\Delta S]$ 的确定与粒子离散程度有关,当粒子直径以对数分档时,矩阵 $[\Delta S]$ 上的各对角线上的元素相等。矩阵 $[\Delta S]$ 事先用单分散标准粒子进行标定,粒子速度 u 用穿越时间法测得,这样在某段采样时间内,采集脉冲信号峰值,并将采集到的脉冲信号峰值按划分好的档次,分档计数,得到测量值 $[C]$ 。理论上可直接对 $[\Delta S]$ 求逆矩阵 $[\Delta S]^{-1}$,通过方程(2),求得被测微粒群的各直径档次的粒子数(即粒子的浓度和粒度的分布)。但实际测量系统总存在测量误差,

在该系统中产生误差的因素是测量区穿越面积矩阵 ΔS 标定误差、激光器功率波动、光电倍增管零漂和放大电路的零漂及非线性等影响脉冲高度峰值计数 C 误差。方程(2)可能是严重病态方程,为此采用二种方法求解:一是无分布型,利用非负最小二乘法;二是分布型,利用反映微粒群直径分布统计规律的分布函数,如上限分布函数(Upper-Limit)和 R-R 分布函数(Rosin-Rammlar),先给定分布函数初值,代入方程(2)计算,构成一个目标函数,利用有约束条件的最优化方法,使计算值与测量值之差的平方和达到最小,得到最优化分布参数,确定被测微粒群的尺寸分布函数。

2 标定试验

从方程求解被检测粒子群的浓度分布,关键是如何准确标定穿越面积矩阵 ΔS 。利用单分散体标准粒子发生器对本实验系统进行标定。单分散粒子是通过单分散气溶胶发生器产生,其原理如图 2 所示。振动孔发生器基于圆柱形喷嘴液柱的不稳定和断开的原理,如果在喷嘴液柱上施加一个适当频率的振动,断开过程能够被控制而产生非常均匀的液滴,液滴直径可用经验公式计算:

$$D_d = [6Q(\pi f)]^{1/3} \quad (3)$$

式中, Q 为液体流量; f 为振动频率。

液体流量由精密注射泵控制,振动频率要在 25kHz 以上,则获得稳定的液滴。如果挥发性溶剂中含有非挥发的溶质,被雾化后,溶剂从液滴表面蒸发,而得到非挥发性的溶质粒子,粒子直径为

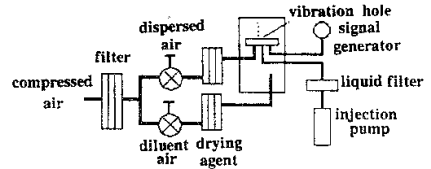


Fig.2 Scheme of standard particle generator

$$D_p = k^{1/3} D_d \quad (4)$$

式中, k 为溶质在液滴中的体积浓度。

由于在实验中受到空间的限制,无法满足液滴表面溶剂蒸发所需的长度,就直接采用 99% 的纯乙醇,并把测量区布置在液滴出口处,稀释空气量置于最小值,以避免液滴蒸发造成的标准粒径误差。

表 1 例举了振动频率为 30kHz, 40kHz 和 50kHz, 液体流量为 0.321mL/min, 99% 纯乙醇产生的标准粒径及这些标准粒子散射的脉冲信号峰值归档情况。

粒子数密度 N_m 由下式计算:

$$N_m = C_i(u \cdot S_t \cdot \Delta t) \quad (5)$$

式中, C_i 为各档次脉冲数的总和; u 为粒子通过测量区的速度,可利用穿越时间法测得; Δt 为峰值采样时间;

Table 2 Transit area matrix $[\Delta S] \times 10^{-8} m^2$ at $\beta = 0.21$

ΔS_1	4.74	ΔS_6	4.92
ΔS_2	5.09	ΔS_7	1.97
ΔS_3	3.91	ΔS_8	1.32
ΔS_4	6.36	ΔS_9	0.82
ΔS_5	6.03	ΔS_{10}	1.65

S_t 为穿越总面积。

测得信号脉冲峰值 C , 代入方程(2), 利用非负最小二乘法程序, 确定 ΔS 矩阵。表 2 列举当 $\beta = 0.21$, $S_t = 3.67mm \times 10^{-7}mm$ 的矩阵标定值。

Table 1 Scattered signal peak ranged by standard particle

peak range	peak	particle diameter		
		70 μm	63 μm	59 μm
1	37 ~ 45	132	144	230
2	45 ~ 55	142	273	200
3	55 ~ 67	109	218	148
4	67 ~ 81	177	212	92
5	81 ~ 98	168	79	98
6	98 ~ 118	137	63	71
7	118 ~ 143	55	9	29
8	143 ~ 174	37	2	0
9	174 ~ 210	19	0	0
10	210 ~ 255	46	0	0

3 实验装置和试验结果

气固两相试验台架如图3所示,由鼓风机出来的气流进入管道,携带由给粉机送入被测颗粒,气粉混合后流入内径为42mm的水平喷嘴。由于测量室(2000mm×600mm×800mm)的尺寸远大于喷嘴出口直径,故认为是气固两相自由射流。测量室壁面设有光学窗,用气流冲刷装置防止颗粒吸附在光学窗。

激光测量装置光学系统原理图示于图1。5mW He-Ne激光器射出的光束,由焦距为-83mm透镜扩束,并由焦距为146mm的透镜会聚,测量区的束腰直径为270mm,接收透镜的焦距为398mm。挡光片遮挡入射光束,并与接收透

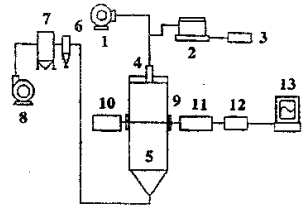


Fig.3 Air-solid two-phase experiment unit
1—blower 2—powder feeder 3—DC power supply 4—jet pipe 5—chamber 6—cyclone 7—dust remover 8—exhaust blower 9—optical windows 10,11,12—laser measuring system 13—computer

Table 3 Particle size distribution and concentration at $x/D = 5$, $y = 0$

particle diameter (μm)	particle number ($10^8/\text{m}^3$)	particle concentration (cm^3/m^3)
10.0~23.1	1.3322	91.5
23.1~27.3	1.0083	
27.3~32.3	0.7037	
32.3~38.2	0.5047	
38.2~45.2	0.0961	
45.2~53.8	0.0934	
53.8~63.3	0.0067	
63.3~74.9	0.0003	
74.9~88.7	0.0577	
88.7~105.0	0.0577	

镜光轴的夹角为 10° ,此角度决定着散射光响应函数。测量装置安装在测量室两侧、二维移动的刚性台架上,可测量任一射流截面上颗粒的粒度、浓度和平均速度。被测颗粒为氧化铝粉末,粒径范围为 $10 \sim 105\mu\text{m}$ 。表3为 $x/D = 5$ 截面中心处($y = 0$)颗粒的粒度分布测量值, x 为离射流出口的距离; D 为射流喷嘴内径。

4 结 论

(1)本实验装置适合于气固、汽液两相流中同时诊断颗粒相粒度、浓度,具有光学系统结构简单、造价低、空间分辨率高的特点;(2)不但对单峰值分布的颗粒相进行诊断分析,而且适合于多峰值分布的颗粒相的诊断分析;(3)通过单分散体标准粒子发生器对本实验系统进行标定试验,得到消除由于激光束光强的高斯分布和颗粒轨迹的影响矩阵。

参 考 文 献

- Holve D J, Self S A. Appl Opt, 1979, 18(10):1632~1645
- 盛德仁,朱伊杰. 激光技术, 1998, 22(2):80~84
- 王乃宁,尉士民. 工程热物理学报, 1999, 20(2):238~241
- Nefedov A P, Petrov O F, Vaulina O S et al. Appl Opt, 1998, 37(9):1682~1689

* * *

作者简介:盛德仁,男,1960年2月出生。副教授。主要从事汽液、气固两相流激光测量、火电厂生产实时监测与管理网络系统的研究。

收稿日期:1999-04-05 收到修改稿日期:1999-06-07