

PSS 激光瞬态颗粒测量装置的研制和应用

张志伟 郑刚 虞先煌 王乃宁
(华东工业大学动力学院, 上海 200093)

提要 激光夫琅和费衍射测粒技术正日趋成熟, 应用领域也在不断拓展。为了测量和分析瞬态喷雾过程的雾化特性, 作者设计一激光瞬态颗粒测量装置, 并以此对标准颗粒、医用喷雾器、柴油机喷嘴、结晶成核过程等作了验证试验, 证明其具有测量准确、快速简便、自动化程度高等优点。

关键词 激光夫琅和费(Fraunhofer)衍射, 瞬态脉冲喷雾, 同步触发

1 引言

目前, 在光散射颗粒测量仪器中, 激光衍射式颗粒测量仪得到了最为广泛的应用。它的显著特点是: 测量精度高、反应速度快、重复性好、可测粒径范围广、可进行非接触测量等, 在稳态雾化的颗粒测量中已得到普遍一致的公认。而在一些特殊场合, 测量对象往往是高速运动、瞬间即逝的, 需要有与此相应的瞬态颗粒测量手段。为此我们参照国外同类仪器, 研制成 PSS 激光瞬态颗粒测量装置, 满足瞬态喷雾及颗粒的测量要求。

2 基本光学原理

我们所研制的衍射式激光测量装置的工作原理是将夫琅和费衍射和米(Mie)氏散射理论相结合。物理光学推论, 颗粒对于入射光的散射服从于经典的米氏理论。米氏散射理论是麦克斯韦电磁波方程组的严格数学解, 夫琅和费衍射只是严格米氏理论的一种近似, 适用于当被测颗粒的直径 D 远大于入射光波长 λ 时 ($D \gg \lambda$) 的情况。夫琅和费衍射假定光源和接收屏幕都距衍射屏无穷远, 从理论计算上考虑, 夫琅和费衍射要简单得多。

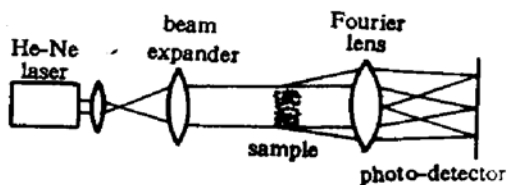


Fig. 1 Scheme of a diffraction-type laser sizer

装置原理图如图 1 所示。氦氖激光器发出波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 的单色光, 经空间滤波和扩束透镜, 滤去杂光并获得直径约为 $8 \sim 10 \text{ mm}$ 的平行光束。当该平行光照射到测量区中的颗粒群时便会产生光的衍射现象。衍射光的强度分布与测量区中被照射的颗粒直径和颗粒数有关。在测量区

后放置一接收透镜, 它将所有颗粒产生的散射光聚焦到该透镜的后焦面上。后焦面上放置一多元光电探测器, 光电探测器由同心的 30 多个半圆环组成, 它将照射到每个环面上的衍射光能

量转换成电信号输出,用于测量衍射光强及其空间分布。各环输出信号接入计算机进行处理,算出测量区中被测颗粒的粒径分布等参数。

根据衍射原理,当测量区中有一直径为 d 的颗粒时,任意角度下它的衍射光强分布为

$$I(\theta) = I_0 \frac{\pi^2 d^4}{16 f^2 \lambda^2} \left[2 \frac{J_1(X)}{X} \right]^2 \quad (1)$$

式中 f 是接收透镜的焦距, λ 是入射光波长, J_1 是一阶贝塞尔函数,而参数 $X = \pi d \sin \theta / \lambda$, θ 是散射角。衍射光强分布落在光电探测器第 n 环(环半径从 S_n 到 S_{n+1} , 对应的散射角从 θ_n 到 θ_{n+1}) 上的光能量为

$$e_n = \frac{\pi d^2}{4} I_0 [J_0^2(X_n) + J_1^2(X_n) - J_0^2(X_{n+1}) - J_1^2(X_{n+1})] \quad (2)$$

式中, J_0 为零阶贝塞尔函数。如果测量区中同时有 N 个直径为 d 的颗粒存在,则第 n 个光环上所接收到的光能量将是一个颗粒时的 N 倍($N \cdot e_n$)。以此类推,当颗粒群中直径为 d_i 的颗粒共有 N_i 个,则颗粒群总的衍射光能将是所有各个颗粒衍射光能之和,即

$$e_n = \frac{\pi I_0}{4} \sum_i N_i d_i^2 [J_0^2(X_{i,n}) + J_1^2(X_{i,n}) - J_0^2(X_{i,n+1}) - J_1^2(X_{i,n+1})] \quad (3)$$

如果尺寸分布用重量频率 W 表示, W 和 N 之间的关系为

$$N_i = \frac{6W_i}{\pi \rho d_i^3} \quad (4)$$

式中 ρ 为颗粒物质的密度,将上式代入式(3)可得

$$e_n = \frac{3I_0}{2\rho} \sum_i \frac{W_i}{d_i} [J_0^2(X_{i,n}) + J_1^2(X_{i,n}) - J_0^2(X_{i,n+1}) - J_1^2(X_{i,n+1})] \quad (5)$$

式(5)建立了光电探测器各环的衍射光信号与被测颗粒粒径及分布之间的对应关系,将上式写成矩阵形式则为

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

矩阵 T 称为系数矩阵,它与光电探测器的几何尺寸和颗粒的直径分档有关。在实际计算中,我们将直径分成 M 个小区间,其直径区间的选取与探测器各环的半径按下式计算

$$\frac{\pi D S_n}{\lambda f} = 1.357 \quad (7)$$

我们的探测器使用 15 个有效环。把每个有效环的几何尺寸代入上式就可求得相应的颗粒粒径区间,最靠近中心的那个有效环的内半径决定了整个直径区间的上限,从而将直径分成了 15 个小区间。如果 f 越大,整个直径区间的各个直径也就越大,这就是说,换用不同焦距的透镜,可以测量不同直径范围的颗粒。由于喷雾测量有其特点,颗粒大小有一定范围,且空间弥散度较大,测量时需要镜头等装置进行保护,故一般选用 100 或 300 mm 的透镜。

这样,只要给定接收透镜的焦距 f ,直径区间就能确定,由式(5)就可算得系数矩阵,一旦测出 15 个有效环上的光能分布 E ,通过对式(6)所列线性方程组的求解,就能得到颗粒尺寸的重量分布 W 。但是,直接求解该线性方程组很繁琐。为方便起见,在数据处理时常采用最小二乘法原理。假定重量分布 W 符合某一分布规律(称分布函数限制法),或初始值任意假定(称自由分布法),计算光电探测器 15 个环的衍射光能量,并一一与实际值比较,直到二者之间的误差减至最小为止。

3 主要技术性能指标介绍

测量对象：气液、气固、液固、液液等双相介质中的颗粒。颗粒可以是稳态的，也可以是非稳态的（非稳态是指在甚短时间内，颗粒的浓度、尺寸大小及分布是变化的，并有可能以较快速度作空间运动的）。

可测参数：颗粒粒径的重量频率分布曲线和重量累积分布曲线，平均粒径 D_{32} ，中位径 D_{v50} ，以及 D_{v10} ， D_{v90} ，体积百分比浓度 $VC(\%)$ ，行程速度。

瞬态指标：32 通道一次连续采样，即单次可计算数据的采集时间为 $300 \mu\text{s}$ ，16 次不间断连续采样的最短时间为 5 ms。每次采样的间歇时间可从零至无限任意调整。

颗粒尺寸分布计算模式：自由分布、Rosin-Rammler 分布、对数正态分布。

粒径测量范围： $0.5 \sim 1000 \mu\text{m}$ 。配备不同焦距的接收透镜可实现不同的测量范围。在对喷雾的测量中，需要采取一些保护镜头的措施，镜头表面需要离开喷雾场一定距离，所以推荐使用 100mm 或更大焦距的镜头。

4 试验验证

PSS 激光瞬态颗粒测量装置于 1993 年 9 月末试制成功，经大量的调试工作，到年底已可用于正常的测量，为考核测试装置的性能及测量精度，我们进行了一些验证试验。

4.1 聚苯乙烯标准粒子的测量

按国际惯例，聚苯乙烯标准粒子是广泛用于验证各种颗粒测量仪器性能的有效手段。我们测量所用的样品为核工业部北京第五研究所生产的聚苯乙烯标准颗粒，标签直径 D 分别为 $2.08 \mu\text{m}$ ， $3.30 \mu\text{m}$ ， $5.06 \mu\text{m}$ ， $10.14 \mu\text{m}$ 。对每一种标准粒子，我们都反复进行了多次测量。鉴于篇幅所限，仅以 $2.08 \mu\text{m}$ 标准粒子进行的 5 次测量（每次中含 16 次独立测量）的计算结果作为示例。表 1 中 16 次中位径的平均值为 $\bar{D} = \sum_{i=1}^{16} D_i / 16$ ，最大分散度为 $\delta = \frac{|D_i - \bar{D}|_{\max}}{\bar{D}} 100\%$ ，与标签直径之间的相对误差为 $e = \frac{|\bar{D} - D|}{D} 100\%$ 。

Table 1 Experimental results of standard latex sphere

No. i	D_i				
	1	2	3	4	5
1	2.01	2.00	2.00	2.02	1.96
8 ~ 15
16	2.01	2.02	2.02	2.01	1.99
\bar{D}	1.99	2.00	2.00	1.99	1.99
$\delta (\%)$	3.02	3.50	2.50	4.52	3.01
$e (\%)$	4.32	3.84	3.84	4.32	4.32

4.2 柴油机喷嘴试验

我们这项设计的初始宗旨是用于研究喷嘴瞬态雾化场特性，因此作为鉴定依据，喷嘴试验是必不可少的。我们将一型号柴油机喷嘴安装于喷油嘴校验器上，调节测量点位子、油泵压力、

油温、触发方式、触发延迟时间、采样间隔、单脉冲及连续脉冲等,作了大量的验证试验。表 2 所列为一组具有代表性的数据。

Table 2 Experimental results of diesel nozzle spray

No.	OB	log err.	$D[V10]$ (μm)	$D[V50]$ (μm)	$D[V90]$ (μm)	$D[3,2]$ (μm)	VC (%)	N	X_{bar}
0	0.40	5.64	11.87	43.07	115.27	22.95	2.80E-02	1.47	54.74
1	0.29	4.93	9.93	33.77	78.33	19.12	1.54E-02	1.54	42.60
2	0.24	5.02	10.54	34.36	77.87	20.09	1.31E-02	1.60	43.01
3	0.21	5.36	11.47	31.01	63.09	20.89	1.20E-02	1.91	37.37
4	0.21	5.03	12.74	32.51	64.75	22.74	1.30E-02	2.02	38.80
5	0.20	5.13	13.75	29.36	49.50	23.12	1.21E-02	2.52	33.86
6	0.19	5.50	11.08	23.98	40.30	18.72	9.16E-03	2.48	27.73
7	0.17	5.23	8.39	20.56	36.70	14.86	6.53E-03	2.11	24.42
8	0.19	5.17	7.32	16.77	28.57	12.66	6.48E-03	2.29	19.68
9	0.16	5.68	6.50	14.07	23.57	10.97	4.63E-03	2.47	16.28
10	0.17	5.10	6.42	15.77	27.95	11.41	5.02E-03	2.10	18.74
11	0.17	5.18	5.49	14.63	27.42	10.12	4.40E-03	1.93	17.61
12	0.14	5.35	5.35	14.79	28.17	10.00	3.46E-03	1.85	17.94
13	0.18	5.70	5.62	13.64	24.65	9.98	4.59E-03	2.14	16.14
14	0.13	5.70	5.04	12.78	23.81	9.14	3.06E-03	2.02	15.30
15	0.14	5.98	4.57	11.32	20.52	8.22	2.97E-03	2.08	13.45

Name: DIESEL SPRAY, Date: 01-05-1994. Focus: 100mm, Trigger Point: 95%, Pressure: 10 MPa

试验工况为油压 10 MPa,油温 8 °C,测点距离喷嘴口 300 mm,透镜焦距 100 mm,单脉冲喷雾,无延迟自触发。分析结果数据,测量初始时平均粒径较大,约 43 μm ,而且较为分散,从约 10~120 μm ;到最后第 16 次测量时,平均粒径减小为 11 μm ,分布范围集中在 4~20 μm 之间;且浓度也呈减小之势,表明喷雾场向周围扩散,局部区间内颗粒减少,粒径减小。

5 结 论

激光衍射技术应用于超细微粒的测量是近年国际上较普遍的发展趋势,用于瞬态喷雾测量及瞬态过程监测更具有测量准确、快速简便、自动化程度高等优点。它可作为检验和控制产品质量、新品研制开发的一个有力工具和手段。

参 考 文 献

- 1 P. G. Felton. Measurement of drop size distribution in dense sprays by laser diffraction. ICLASS-85, IVA/4/1
- 2 M. Tabata. Effect of fuel viscosity and surface tension on diesel spray drops. ICLASS-85, IIB/1/1
- 3 A. J. Yule. Diesel spray structure. ICLASS-85, IIB/2/1
- 4 Mitsushige Nakayama. Developments of a high-resolution and a time-resolved particle sizer and its application to intermittent spray sizing. ICLASS-88, A5-1

A Novel Laser Size Analyzer within Fraunhofer Diffraction Used to Measure Intermittent Sprays

Zhang Zhiwei Zhen Gang Yu Xuanhuang Wang Naining

(East China University of Technology, Shanghai 200093)

Abstract In order to study and estimate the transient characteristics of an intermittent spray in one shot injection, a novel particle sizer was designed. A detector array of a conventional particle sizer based on Fraunhofer diffraction was used and a high-resolution and a time-resolved particle sizer had been made. The time-dependent characteristics of a spray in one shot were analyzed.

Key words laser Fraunhofer diffraction, intermittent spray, transient, synchronous trigger

全国激光束质量参数测试比对专家讨论会在忻州召开

由国家科委高技术局主办,国家技术监督局及中国计量科学研究院协办的“全国激光束质量参数测试比对专家讨论会”于1995年8月17~20日在山西省忻州市召开。全国近20个有关单位约30名专家参加了会议。

会议分析了我国激光束质量测试技术的现状,讨论了国际标准化组织推荐的ISO/TC172/SC9/WG1国际标准文件的几个修改稿,以及由中国计量科学研究院编写的“激光束宽、发散角、光束传播因子测试方法(讨论稿)”。会议还讨论了我国推行这些文件的大致进程安排。会议决定以中国计量科学研究院研究的“激光束质量检定的计量标准”作为各单位仪器比对标准,先对CO₂激光及He-Ne激光进行仪器测试比对,考查各送检单位的仪器特性。

(徐德行)