

激光散射法用于雾化场颗粒 Sauter 平均直径测量的若干问题研究^{*}

万 群, 韩肇元, 蔡庆军, 姚久成

(中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 通过实验室中的模拟研究, 探讨了不同的颗粒浓度(体积分数)造成散射光强度和分布的差异对于 Sauter 平均直径测量的影响。实验结果表明, 对同一种砂粒试样, 由于砂粒浓度造成的散射光的强度和分布的不同, 对 Sauter 平均直径的测量结果基本上没有影响。还用 CCD 相机对按一定比例混合而成的玻璃砂进行显微放大成像, 得到砂粒的 Sauter 平均直径, 此法对测试系统的校验有很大的帮助。

关键词: 雾化场; 激光散射法; Sauter 平均直径

中图分类号: O359.1

文献标识码: A

1 引 言

液体抛撒、破碎和雾化的研究在军事、工业、农业中都有广泛的应用背景。雾化所形成的云雾的物理特性, 如颗粒的平均直径及其分布, 对于雾化的研究具有至关重要的意义。

激光散射法是一种快速无干扰的测量方法, 也是较早用来测量颗粒群的平均直径的一种实验技术。激光散射法测量颗粒平均直径基于 Dobbins 理论。R. A. Dobbins 等^[1]发现, 在一定的条件下, 对于不同的颗粒尺寸分布, 曲线 $f(\theta) \sim \pi D_s \theta / \lambda$ 十分相近, 说明不同的颗粒尺寸分布近似存在着相同的关式。J. H. Roberts 等^[3]用大量实验所得的曲线证明, 在偏斜系数满足 $D / d_\infty = 0.13 \sim 0.8$, 无因次半宽度满足 $Q = 0.5 \sim 2.10$ 的情况下, 可以认为曲线 $f(\theta) \sim \pi D_s \theta / \lambda$ 是唯一的。这样, D_s 的计算就变得比较简单。

激光散射法多用于工程热物理领域中小空间尺度条件下的测试, 如喷油嘴雾化场中的液滴直径的测量, 尚未见该方法用于野外大空间尺度条件下的液体瞬态抛撒过程中的 Sauter 平均直径测量方面的报道。如果把这种方法用于野外大尺度空间, 如具有十几米空间尺度的非定常抛撒、雾化过程中液滴和雾滴的测量, 还有不少新问题, 比如, 雾化区的云雾浓度对颗粒 Sauter 平均直径测量是否有影响等, 有待于深入的研究。本文中, 我们通过实验室模拟探讨了这个问题。

2 测试系统和实验方法

2.1 测试系统

2.1.1 光路

采用图 1 所示的光路。此光路曾用于野外大尺度环境中液体抛撒所形成的云雾的 Sauter 平均直径的测量。He-Ne 激光器产生单色平行光束(波长为 632.8nm), 经扩束镜, 光束截面扩大, 再经过一个凸透镜, 会聚于准直光阑孔。自光阑孔发出的光, 经过准直透镜, 得到平行光束, 光束经过抛撒区, 发生散射后, 再经过一个凸透镜(其焦距根据测试范围可以选择, 所使用的焦距为 1980mm), 会聚于由感光元件做成的采集器上。光电采集器由传感器触发, 采集到的数据经处理后可以得到表征颗粒尺寸大小及分布的参数, 从而得出 Sauter 平均直径。

* 收稿日期: 2000-11-17; 修回日期: 2001-02-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(10072061)

作者简介: 万 群(1976—), 男, 硕士。

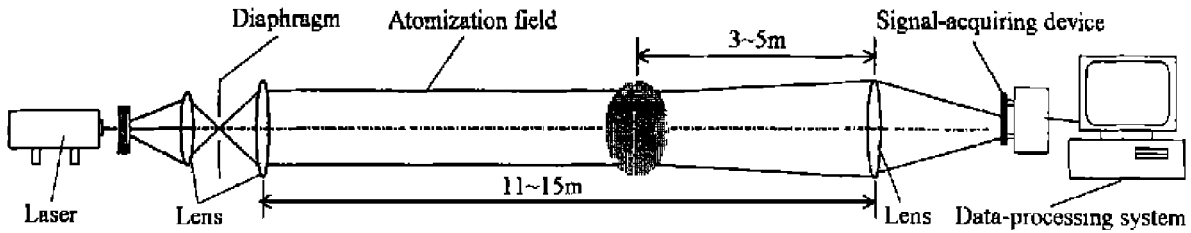


图 1 激光散射法测量颗粒直径的光路图

Fig.1 Optical layout for measuring the sizes of liquid droplets

2.1.2 光电采集器

图 2 为光电阵列的示意图,阵列从第 0 到 15 共有十六个光电单元,第一个单元为中心光强所在位置^[3]。光电阵列单元号与其位置关系见表 1。光电采集器的研制以及测试系统的某些技术问题将另文发表。

2.1.3 抛撒装置

图 3 是抛撒装置的侧视图。该装置是一个 13cm×13cm×27cm 长方体,在两个对面开有直径为 7cm 的圆孔,光束从中经过。玻璃砂从上倾倒下来,落到圆锥上散开,通过四层 1mm×1mm 方孔的筛子,最终通过激光光束发生不相关散射。

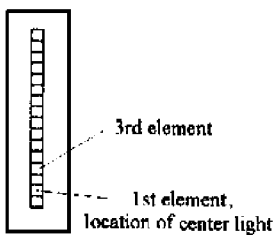


图 2 光电阵列示意图

Fig.2 Scheme of photoelement array

表 1 光电阵列单元与其位置对应关系

Table 1 The photoelements and their corresponding positions

单元号 <i>N</i>	位置 /mm	单元号 <i>N</i>	位置 /mm
0	-2	8	7
1	0	9	8
2	1	10	9
3	2	11	10
4	3	12	13
5	4	13	16
6	5	14	19
7	6	15	22

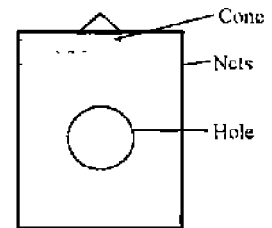


图 3 抛撒装置侧视图

Fig.3 Side view of casting device

2.2 实验方法

为了研究不同因素对实验结果的影响,用玻璃砂在抛撒区抛撒,用激光散射法测出颗粒的 Sauter 平均直径,然后与显微读数所得到的标准值作对比。为此,要先得到一组具有一定配比、Sauter 平均直径为已知的颗粒群。但如上文所述,由于激光散射法必须要求无因次半带宽度 $Q=0.5 \sim 2.10$, 偏斜系数 $\bar{D}/D_{\infty}=0.13 \sim 0.8$ 的条件,随意配出来的玻璃砂通常会不满足。可以用以下方法解决这些问题。

(1) 由于

$$\alpha = (D_{\infty}/D - 1) \exp\left[\frac{1}{\delta} (5\bar{D}/D_{\infty} - 2)\right]$$

$$\left[\frac{D_{\pm 1/2}}{D}\right]^4 \frac{D_{\infty} - D_{\pm 1/2}}{D_{\infty} - D} = 2 \exp\left\{-\delta \left[\left|\ln \frac{\alpha D_{\pm 1/2}}{D_{\infty} - D_{\pm 1/2}}\right| - \left|\ln \frac{\alpha D}{D_{\infty} - D}\right|\right]^2\right\}$$

$$Q = (D_{+1/2} - D_{-1/2})/D$$

式中: α 、 δ 为 ULDF 分布函数的参数, D_{∞} 为最大直径, D 为最可几直径, $D_{\pm 1/2}$ 为出现频率是最可几直径 D 出现频率的一半所对应的直径。

J.H. Roberts 等^[2] 给出了数据表,从中提取一组数据,并指定 D_∞ ,根据 ULDF 分布公式

$$\begin{cases} \frac{dV_c}{dy} = \frac{\delta}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{2}{\delta} y^2} \\ y = \ln \frac{\alpha D}{D_\infty - D} \end{cases}$$

可以得到一定的配比。式中: V_c 为累积容积分数。

(2)按上面的比例将玻璃砂配好,放到显微镜下,用 CCD 扫描,得到图像如图 4 所示。利用图像处理软件可以读出颗粒的直径

$$D_s = D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^N D_i^2}{\sum_{i=1}^N D_i^3}$$

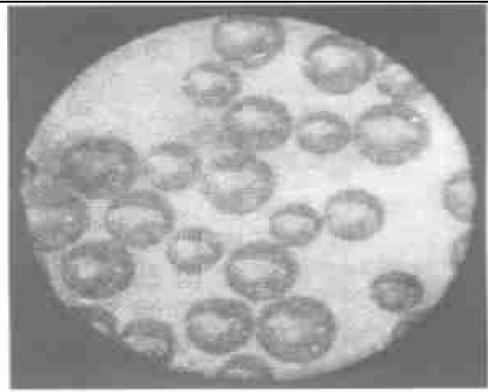


图 4 经显微镜放大后 CCD 扫描所得玻璃砂图像

Fig.4 Image of sand sample scanned by CCD under microscope

3 实验结果和讨论

3.1 校验结果

实验采用了不同颗粒尺寸的三组配比,将配好的玻璃砂置于显微镜之下用 CCD 采集图像,计算得出玻璃砂的 Sauter 平均直径的校验值 D_{sm} 。三组配比的颗粒尺寸及相应参数见表 2。

表 2 玻璃砂的参数

Table 2 Parameters of sand sample

No	$D_{sm} / \mu\text{m}$	α	δ	$D_\infty / \mu\text{m}$	D / D_∞	Q	配比 / (%)			
							100 ~ 150 μm	150 ~ 200 μm	200 ~ 300 μm	300 ~ 440 μm
1	277	0.54	1.10	440	0.50	0.97	3	8	48	41
2	205	0.83	1.37	300	0.43	0.80	20	38	42	0
3	171	1.15	1.43	300	0.33	0.90	50	40	10	0

3.2 抛撒浓度对测试结果的影响

激光散射测量法是以不相关散射为前提的,因此必须保证适当的颗粒浓度。所谓不相关散射,是指颗粒的散射不因其他颗粒的存在而受影响的散射。如果为相关散射, M 个颗粒作为散射中心的集合体的相关散射强度将不等于单个颗粒散射强度的 M 倍^[4]。对于不相关散射,颗粒的间距必须大于颗粒半径的三倍,在野外云雾实验以及实验室中的模拟实验都属于不相关散射。

本实验中,对表 2 中三组不同配比的玻璃砂进行了试验,各光电单元的光强数据及分布见表 3 和图 5。 D_s 是利用光电单元光强数据计算出来的 Sauter 平均直径, D_{sm} 为玻璃砂 Sauter 平均直径的样验值。

未发生散射时中心光强为 $5.71 \times 10^5 \text{ lx}$ 。注意到不同 D_{sm} 时三种配方实验中心光强(即光电单元 1 处接受的光强)不同的衰减程度:当 $D_{sm} = 277 \mu\text{m}$ 时光强衰减率分别为 5.64%、23.2%、33.5%,当 $D_{sm} = 205 \mu\text{m}$ 时分别为 18.4%、27.0%、38.3%,当 $D_{sm} = 171 \mu\text{m}$ 时分别为 17.5%、30.0%、42.8%。可见,对于同样的试样(颗粒群),散射光的强度和分布的差别很大,但所得到的 Sauter 平均直径在一定的误差范围内是相同的。Sauter 平均直径由 $277 \mu\text{m}$ 到 $205 \mu\text{m}$ 再到 $171 \mu\text{m}$ 。可以认为在一定的条件下,抛撒颗粒的浓度对实验结果基本没有影响。这就验证了 J.Swithenbank^[5] 和 P.G.Felton^[6] 等的研究,他们认为光束经过颗粒群光强衰减不超过 50%时,复散射效应可以忽略不计。

表 3 光电阵列的光强值

Table 3 Light intensity along photoelements

lx

单元号	$D_{sm} = 277\mu\text{m}$			单元号	$D_{sm} = 205\mu\text{m}$			单元号	$D_{sm} = 171\mu\text{m}$		
	No. 1	No. 2	No. 3		No. 1	No. 2	No. 3		No. 1	No. 2	No. 3
1	538774.1	438258.5	379581.8	1	465675.3	416963.6	352115.7	1	471086.3	400838.8	326769.7
2	1746.423	2840.790	3359.539	2	1660.565	2019.218	2430.531	2	1352.567	1842.995	2248.813
3	733.4543	1065.411	1528.538	3	702.4075	980.8589	1325.269	3	539.5331	973.7013	1330.549
4	335.4135	450.3737	750.4236	4	378.5128	561.0955	809.9819	4	352.8522	644.9610	932.8406
5	141.1164	188.1463	318.2766	5	172.7341	275.9758	424.3274	5	220.2396	389.4188	590.4813
6	48.26580	64.82791	109.8462	6	66.69790	118.1473	199.5538	6	126.0643	209.8608	337.2596
7	16.46023	21.87642	35.77324	7	25.83849	50.30549	94.34908	7	66.98058	103.5112	181.4179
8	11.33243	13.21721	21.56597	8	14.53122	27.65376	53.20187	8	35.55111	50.37900	96.49998
9	11.75954	13.50807	22.11952	9	11.85091	19.07066	34.76448	9	19.30429	26.65604	53.93779
10	10.04184	11.62231	18.86391	10	9.205317	12.98906	22.60853	10	11.59404	16.19959	33.17717
11	6.508455	7.529836	11.60039	11	5.905317	8.223811	12.73433	11	7.903218	11.27126	21.60686
12	3.649135	3.567995	5.084134	12	3.326797	4.706199	6.802542	12	3.973693	6.038944	9.457984
13	2.259722	1.902924	2.493149	13	1.790663	2.452021	3.798077	13	2.518707	3.725839	5.751063
14	1.941399	1.267652	1.485827	14	1.134215	1.439370	2.093431	14	1.384683	1.822181	2.805472
15	1.048183	0.232538	0.447551	15	0.248898	0.500136	0.876409	15	0.461574	0.812139	1.231636
$D_s/\mu\text{m}$	274	281	278	$D_s/\mu\text{m}$	211	211	206	$D_s/\mu\text{m}$	183	192	179

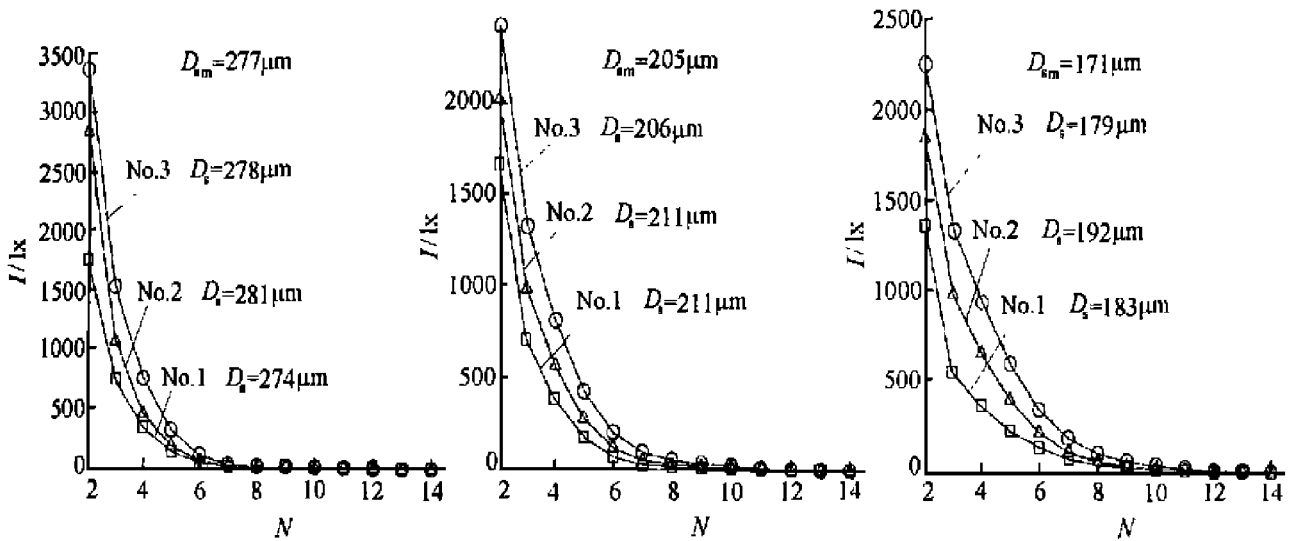


图 5 光电阵列光强分布图

Fig.5 Distribution of light intensity along photoelements

4 结 论

(1)在满足不相干散射的条件下,对于同一种砂粒试样因抛撒的浓度(即体积分数)所导致的散射光强度和分布的不同对颗粒 Sauter 平均直径的测量值基本没有影响。

(2)CCD、显微镜用于玻璃砂颗粒直径的校验是一种行之有效的方法。

在研究过程中,曾得到尹协振教授、杨基明教授、李光华高工的支持,特此表示感谢。

参考文献:

- [1] Dobbins R A, Crocco L, Glassman I. Measurement of Mean Particle Size of Spray from Diffractively Scattered Light [J] . AIAA Journal, 1963, 1 (8): 1882—1885.
- [2] Roberts J H, Webb M J. Measurement of Droplet Size for Wide Range Particle Distributions [J] . AIAA Journal, 1964, 2 (3): 583—585.
- [3] 蔡庆军, 韩肇元, 万群, 等. 液体环二次破碎所形成云雾颗粒尺寸测量和测试系统的标定 [J] . 爆炸与冲击, 1999, 19 (2), 151—157.
- [4] 朱德忠. 热物理激光测试技术 [M] . 北京: 科学出版, 1990.
- [5] Swithenbank J, Beer J M, Taylor D S, et al. A Laser Diagnostic Technique for the Measurement of Droplet and Particle Size Distribution [J] . AIAA Paper, No. 76—69, 1976.

Investigation on Measurement of the Sauter Mean Diameter of Particles in the Atomization Field by Using Laser Scattering Method

WAN Qun, HAN Zhao-yuan, CAI Qing-jun, YAO Jiu-cheng

*(Department of Mechanics and Mechanical Engineering, University of Science and Technology of China,
Hefei 230027, Anhui, China)*

Abstract: Light scattering method has been used to measure mean diameter of particles by D. A. Dobbins for years, but it's seldom used to an outdoor atomization field. In this paper, an experimental simulation to measure Sauter mean diameter (SMD) has been conducted for studying the influence of variety of intensity and distribution of the scattering light, which are caused by particle concentration. The experimental result shows that the different intensity and distribution of scattering light, which are induced by different concentration of sands under the same sample, have no effect on the results of measurement. In addition, an effective way has been used to improve the accuracy of the calibration of the sand sample by using CCD camera and microscope.

Key words: atomization field; laser scattering method; Sauter mean diameter (SMD)