

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*

蔡庆军^a 韩肇元^a 万 群^a 张寿齐^b

(a. 中国科学技术大学力学和机械工程系 合肥 230026)

(b. 中国工程物理研究院 成都 501 信箱 610003)

摘要 介绍了激光散射法测量颗粒尺寸系统的工作原理和标定结果,并对液体环轴对称抛撒进行了光学测量。实验结果表明,液体环二次破碎产生云雾区的液滴 Sauter 平均直径在固定点随时间的增加呈减小的趋势,而云雾区的宽度和云雾区前缘的液滴颗粒的 Sauter 平均直径则随测量的距离增加均有所增加。

关键词 抛撒 二次破碎 Sauter 平均直径

中图法分类号 O353.5

1 引 言

液体燃料的抛撒雾化以及在高速气流作用下的破碎过程是流体力学中一个有广泛应用背景和令人感兴趣的领域。在工业生产、农业灌溉和军事科研中,都要求对液体抛撒、破碎和雾化的过程有深入的研究。

通常,液体的破碎过程可分为首次破碎和二次破碎两个阶段(类似于在燃料抛撒形成爆轰云雾的领域中液体抛撒的近场和远场)^[1]。首次破碎是指被抛撒液体刚开始破碎的阶段,是整个雾化过程的开始。二次破碎是紧接着首次破碎的另一个重要的破碎阶段,它直接决定了雾化液滴尺寸的大小和分布情况。通常意义上的二次破碎是指 $\rho_1/\rho_g > 500$ (抛撒液体和环境气体密度之比大于 500), $Re > 100$ ($Re = \rho_g dv/\mu_g$) 情况下破碎雾化过程。二次破碎与无量纲的 Weber 数和 Ohnesorge 数有很大的关系,其中 Weber 数是阻力和表面张力之比, $We = \rho_g d_0 U_0^2/\sigma$, 而 Ohnesorge 数是粘性力和表面张力之比, $Oh = \mu_1/(\rho_1 d_0 \sigma)^{1/2}$ 。在低 Oh 数的情况下(通常 $Oh < 0.1$),根据 Weber 数的不同,二次破碎可以划分成为几种破碎形式^[2-3]:当 $13 < We < 35$ 时,破碎方式为袋型破碎(在燃料抛撒形成爆轰云雾的领域中,通常认为破碎开始 We 的下限为 5 或 6),即液滴在垂直于流动方向上变形为薄盘,随后圆盘的中心变薄、拉长,并形成成为一个薄袋型的结构,最后这样的薄袋从最薄的地方破碎成小液滴;当 $80 < We < 1000$ 时,破碎为剥落破碎,即液滴在比较高的相对气流的作用下先变形成为液体的薄盘,然后沿薄盘的边缘开始变形,而不是在盘的中心,最后从盘的边缘剥落下小的液滴;当 $35 < We < 80$ 时,在袋型破碎和剥落破碎之间的破碎形式,是一种受两种破碎形式影响的复杂的混合破碎形式;此外,在非常大的相对速度下,当 $We > 1000$, $Re > 500$ 时,可以看到另一种复杂的破碎形式,通常被称为剧烈

* 蔡庆军:男,1971年9月生,博士研究生。

1998-10-20 收到原稿,1998-12-28 收到修改稿。

破碎或爆炸破碎,液滴颗粒在高速气流的作用下瞬间破碎成小的雾滴^[4]。

为了更好地研究液体二次破碎的破碎机理,改善破碎效果,测量二次破碎产生的液滴颗粒尺寸和分布变得十分重要。R.A.Dobbins 于 1963 年提出的用光散射法测定颗粒的平均直径的方法是一个比较简单而实用的方法^[5~6]。这种方法通过测量穿过二次破碎云雾场的激光束产生的散射光,经过计算得出二次破碎产生的颗粒尺寸。

液体轴对称水平抛撒在研制云雾爆轰武器 (FAE) 中有重要的实际应用背景和学术研究价值。由于过去这方面大量的工作集中在野外场地中进行,对液体燃料抛撒初期及后期形成的云雾区特性缺少细致的实验研究,国内外的文献也鲜有介绍。在以前的工作中,我们介绍了液体轴对称水平抛撒的初期破碎,即首次破碎的特性^[7]。本文中我们用可移动式无膜激波管,根据 Dobbins 的激光散射原理,利用光学方法测量了液体轴对称抛撒二次破碎产生液滴颗粒的 Sauter 平均直径在不同时间和空间上的分布规律。

2 测量原理

光线通过含有微粒的介质时会发生光的散射现象,Dobbins 在 1963 年依据颗粒散射原理,把满足上限分布函数 (ULDF)^[8] 且直径为几微米到几百微米的颗粒散射作为衍射散射处理,经过推导和对实验、计算结果的数据整理后发现,对不同的颗粒尺寸分布近似地存在唯一的关系,特别是在 $\chi(\theta)=0.1$ 的地方,各种不同分布得到的点几乎完全重合^[8~9]。其中 $\chi(\theta)=I(\theta)/I(0)$, $I(\theta)$ 为散射光光强, $I(0)$ 为散射光中心光强。这样就可以利用实验测得的 $\chi(\theta)-\theta$ 关系和理论曲线 $\chi(\theta)-(\pi D_s/\lambda)\theta$ 相对应来求解 D_s , 其中 D_s 为液滴 Sauter 平均直径,其定义为

$$D_s = \frac{\int_0^{\infty} N_r(D) D^3 dD}{\int_0^{\infty} N_r(D) D^2 dD} = \frac{\sum n_i D_i^3}{\sum n_i D_i^2} \quad (1)$$

式中: $N_r(D)$ 是颗粒尺寸分布函数。

激光散射法测量液体颗粒 Sauter 平均直径 D_s 的光路如图 1 所示,图中光电接收装置可以测得穿过液体颗粒场的激光光强分布,并通过数据线输入到计算机中。从实验得出的 $I(\theta)-\theta$ 曲线上选择适当的一段,并在其上选定足够的点,通过计算均方根误差的迭代运算,可计算出 $I(0)$,最后利用 $\chi(\theta)-(\pi D_s/\lambda)\theta$ 可得到液滴的 Sauter 平均直径 D_s 。

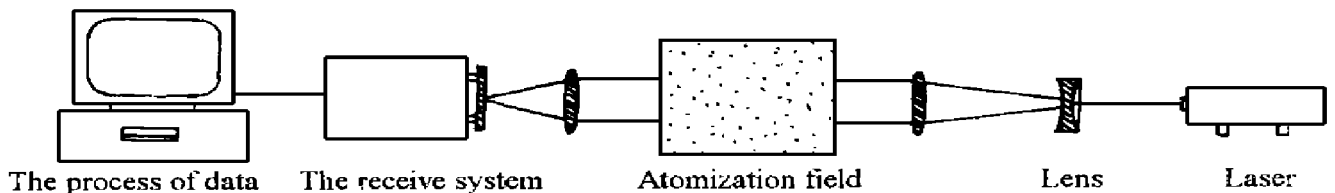


图 1 激光散射法测量液体颗粒尺寸光路

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

3 测试系统的标定

为了验证激光散射法测量系统在测量颗粒尺寸时的可靠性、稳定性和测量精度,必须标定测量系统。选择有确定配比并且已知颗粒尺寸的玻璃粉未来标定这套系统。根据玻璃粉末直

径大小不同,将其分成 4 个组:A 组, $0 \sim 102\mu\text{m}$; B 组, $102 \sim 150\mu\text{m}$; C 组, $150 \sim 200\mu\text{m}$; D 组, $200 \sim 300\mu\text{m}$ 。4 个不同直径范围的玻璃粉末按不同的比例混合,可以得到 10 组标定试样。

标定试样的理论计算、实验测量及其两者之间的误差关系,如表 1 所示。

从表中可以看出,对于以上 10 组标定试样,理论 D_s 值和实验测得的 D_s 值之间最大的相对误差小于 10%。这说明这套光学测量系统有很好的可靠性和精确度,适合用来测量轴对称液体抛撒产生的云雾颗粒尺寸。

表 1 激光散射法测量颗粒尺寸系统的标定

Table 1 Calibration of the system for measuring the size of the droplets by laser scattering method

组号	配比	理论 $D_s/\mu\text{m}$	测量 $D_s/\mu\text{m}$	绝对误差/ μm	相对误差/(%)
1	0.2 : 0.5 : 0.25 : 0.05	115.8	121.6	5.8	5.0
2	0.1 : 0.597 : 0.298 : 0.005	124.3	132.2	7.9	6.4
3	0.1 : 0.55 : 0.3 : 0.05	128.2	124.6	-2.4	-1.9
4	0.1 : 0.45 : 0.35 : 0.1	136.2	142.6	6.4	4.7
5	0.1 : 0.4 : 0.4 : 0.1	139.7	144.8	5.1	3.7
6	0.05 : 0.4 : 0.45 : 0.1	149.2	161.0	11.8	7.9
7	0.005 : 0.38 : 0.515 : 0.1	158.6	158.0	-0.6	-0.4
8	0.04 : 0.21 : 0.55 : 0.2	171.5	184.0	12.5	7.3
9	0.025 : 0.225 : 0.45 : 0.3	179.6	186.0	6.8	4.0
10	0.025 : 0.175 : 0.38 : 0.42	194.0	203.7	9.7	5.0

4 实验装置

如图 2 所示,我们用轴对称 U 型容器和无膜激波管相结合的办法来实现液体环的轴对称抛撒和雾化^[5],并通过移动无膜激波管来调节轴对称抛撒、雾化装置到两反射镜之间测量点的距离。实验中,He-Ne 激光器所产生的激光束,经过透镜变成平行光,然后经过一块 45°角平面反射镜反射后垂直穿过水平抛撒的二次破碎流场。光在穿过流场时和二次破碎颗粒相遇,发生散射,散射光和未散射的光一起在下一块 45°角平面反射镜上被再次反射成水平方向,最后这束光通过透镜聚焦在光电阵列的接受器上。通过固定在无膜激波管上的传感器控制接收器的开启时间,并可以测量延迟时间在 0~250ms 时间范围内的散射光强的变化。实验测得的

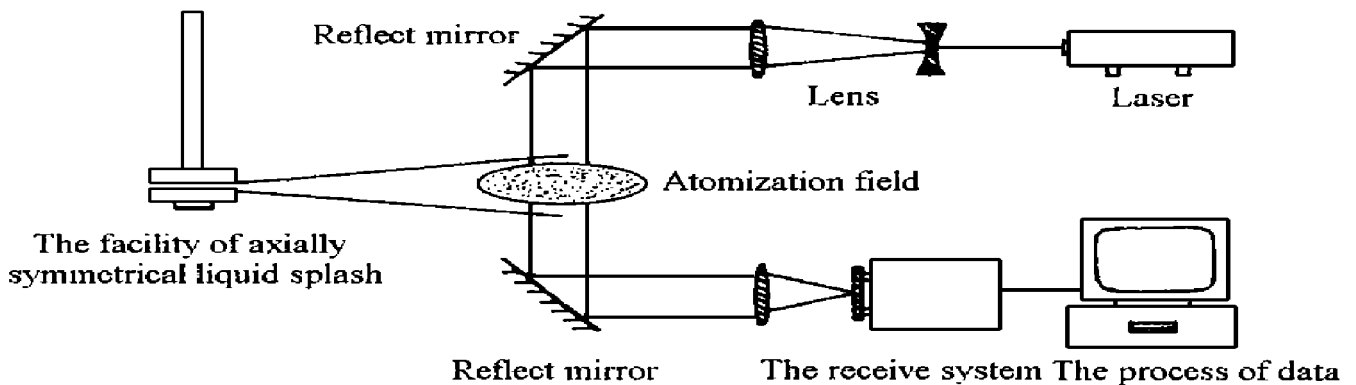


图 2 液体轴对称水平抛撒二次破碎颗粒尺寸的测量光路

Fig.2 Optical layout for measuring droplet size under condition of axisymmetrical secondary breakup of liquid ring

数据通过数据线输入到计算机中进行处理,从而可以得到液体轴对称抛撒二次破碎的液滴 Sauter 平均直径。

5 实验结果及分析

我们用 30ml 和 40ml 的无水乙醇作实验液体,每次实验的激波管充气压力均为 0.6MPa,产生的激波马赫数约为 1.35。

图 3 为光电阵列的示意图,阵列从-1 到 14 共有 16 个光电单元,图中第 0 个单元为散射光中心光强所在。为了说明散射光光强的变化,以光电阵列的第 3 单元为例加以说明。图 4 是液体轴对称抛撒形成的环形云雾区的示意图,它的内外边缘附近分别被称为环形云雾区的前部和后部。

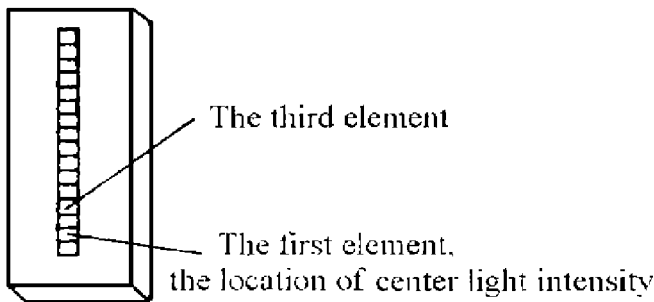


图 3 光电阵列示意图

Fig.3 Scheme of photoelement array

后部和环形云雾区的前缘。

图 5 为测量点距离抛撒处 45.5cm 时,光电阵列上第 3 单元显示出的接受光强随时间的变化规律。从图中不难看出,在二次破碎的液体颗粒没有到达之前,光强处于低位。二次破碎液体颗粒到达时,产生了光强的突跃,即此单元的光强突然增强。这是由于在液体颗粒没有到达时,激光没有产生散射光,在此通道上的光强很弱,液体颗粒到达以后激光束在雾化场中被散射,第 3 单元接受到散射光,产生了光强的突跃。随着时间的进一步推移,散射光渐渐减弱,大约经过 40ms 之后,光强又渐渐降到很弱的状态。

可以看出,二次破碎颗粒刚到测量地点时接受到的散射光光强最强,也就是液体颗粒形成的云雾最浓,随后云雾逐步变稀,40ms 之后可以认为破碎颗粒形成的云雾区已经过去(40ms 之后云雾变得很稀,虽然在光强图上依然可以看到有弱的散射光,但从光强图中已经计算不出液体颗粒的 Sauter 平均直径),流场渐渐恢复到原来无液滴的状态。

图 6 为激光散射法测量液体轴对称水平抛撒二次破碎产生液体颗粒的 Sauter 平均直径随时间的变化。图 6(a)为 30ml 的无水乙醇在离抛撒中心 34.5cm 处的测量结果,图 6(b)为 40ml 的无水乙醇在 75.0cm 处的测量结果。

从图 6(a)可见,二次破碎颗粒刚到达测量地点时,所测量得到的液体颗粒尺寸是最大的,

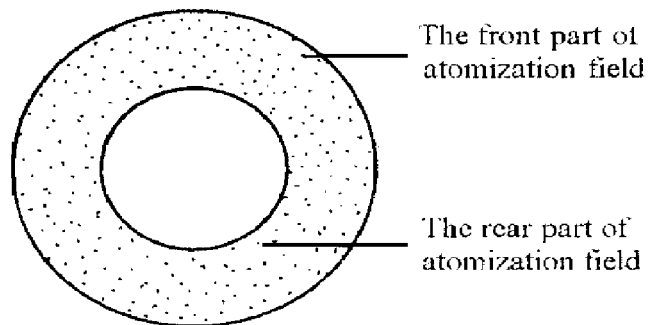


图 4 液体轴对称抛撒形成的环形云雾区

Fig.4 Atomization region formed by dissemination

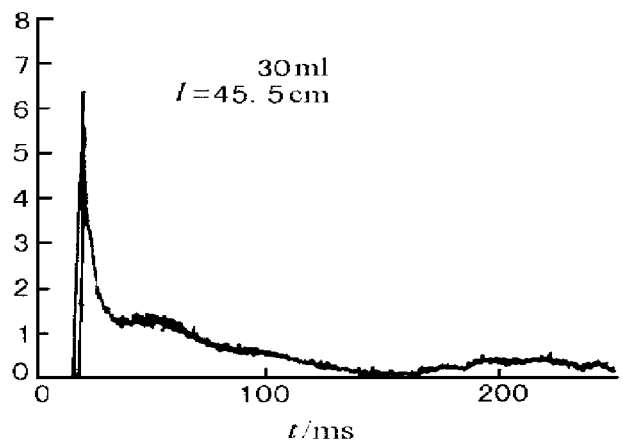


图 5 散射光强随测量时间的变化

Fig.5 Variation of light intensity with time

约为 $84.0\mu\text{m}$ ，然后颗粒尺寸随测量时间的延长而逐步减小，最后带小幅波动稳定在 $51.0\mu\text{m}$ 附近。图 6(b) 也比较明显地表现出了相类似的规律，所不同的是破碎产生的环形云雾区的前缘和后部的液滴尺寸比图 6(a) 所示的液滴尺寸大。

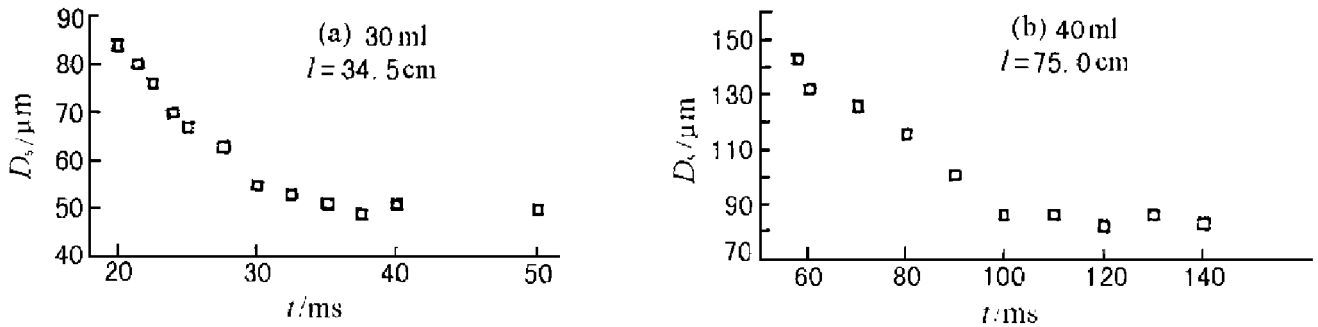


图 6 液滴尺寸随时间的变化规律

Fig.6 Variation of size of particles with time

对于在气体介质中运动的液体块，其阻力和液体截面积的平方成正比，因此，小颗粒液滴受空气阻力而速度衰减较大颗粒液滴更快。这样造成了较大的液体颗粒出现在液体二次破碎环形云雾区的前缘，较小的液体颗粒则跟随在环形云雾区的后部。对于固定地点的测量，先到达的就是较大的液体颗粒，然后逐步减小，最后到的是比较均匀的从大的液体颗粒上破碎下来的小颗粒液滴；另外，由于汽化作用，速度慢而后到的液滴颗粒有更长的汽化时间，进一步使得较小的液体颗粒出现在环形云雾区的后部。随着测量距离的增加，大颗粒液滴和小颗粒液滴在空气阻力作用下速度差增加，它们之间的空间距离也进一步拉开，这也就是图 6(b) 中云雾区持续的时间较图 6(a) 更长的缘故。

从图 6(a) 和图 6(b) 中可以看到，随着环形云雾区向前运动，在 34.5cm 和 75.0cm 处测得的二次破碎产生的小液滴尺寸逐渐减小，最后在云雾区的后部稳定在 $50\mu\text{m}$ 和 $80\mu\text{m}$ 左右。对于前者，由于液滴运动受空气阻力作用时间相对较短，速度衰减较小，达到破碎临界 We 要求的颗粒直径也较小；随着运动距离的增加，速度衰减，破碎产生的颗粒直径也随之增加。如果认为环形云雾区后部的液滴是破碎产生的、不再满足破碎条件的液滴颗粒，可以根据 We 的定义来估算破碎时液滴的运动速度

$$We = \frac{\rho_g \cdot U^2 \cdot d_0}{\sigma} \quad (2)$$

式中： ρ_g 为空气的密度， U 、 d_0 和 σ 分别为液滴的运动速度、颗粒直径和表面张力。 $\rho_g = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ， $\sigma = 0.02 \text{ kg/s}^2$ 。如果取液滴破碎的临界 We 为 5.0 ，当 $d_0 = 50\mu\text{m}$ 时，破碎时的速度为 39.4 m/s ；当 $d_0 = 80\mu\text{m}$ 时，破碎时的速度为 31.1 m/s [10]。

图 7 给出了在不同的测量位置上，在环形云雾区的前缘，所测得的二次破碎产生液体颗粒的 Sauter 平均直径。从图中可以看出，随着测量距离的增加，在环形云雾区的前缘液体颗粒的 Sauter 平均直径增加。

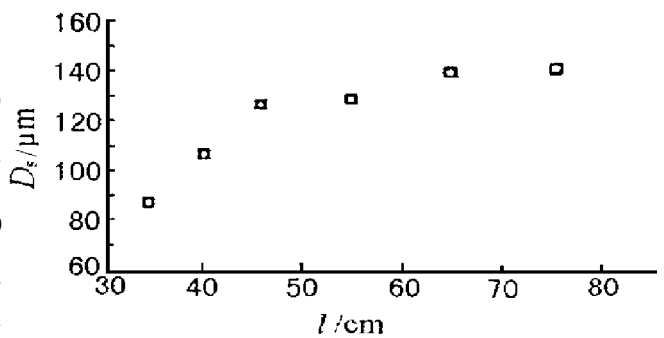


图 7 云雾区前缘的液滴颗粒尺寸随着测量距离的变化

Fig.7 Variation of size of droplets in the front part of atomization region with distance

从图中可以看出，随着测量距离的增加，在环形云雾区的前缘液体颗粒的 Sauter 平均直径增加。

二次破碎产生的较大液体颗粒运动在环形云雾区的前缘,它们在破碎过程中总的尺寸在不断地减小。但是,由于气动阻力的作用,这些颗粒的速度也渐渐衰减到破碎要求的临界 Weber 以下,并不再破碎;另外,小颗粒液滴运动由于速度衰减得更快,它们在环形云雾区的前缘中成分不断减少。这些使得计算液滴 Sauter 平均直径时,随距离的增加,环形云雾区前缘的小颗粒液滴影响减弱,大颗粒液滴的作用增强;再者,液体的挥发作用对小颗粒液滴的尺寸改变较对大颗粒液滴更快、更明显。这些使得在云雾区前缘测得的颗粒 Sauter 平均直径呈现增大的趋势。这反映了在二次破碎形成的环形云雾区的前缘,液体颗粒的尺寸分布偏向于大颗粒的特点。

6 结 论

通过测量液体环二次破碎所形成颗粒的 Sauter 平均直径和对测量结果的分析,得到如下的结论。

(1)激光散射法测量液体颗粒尺寸系统的标定结果表明,这套光学测量系统有很好的可靠性和精确度,适合用来测量轴对称液体抛撒产生的云雾颗粒尺寸。

(2)在液体环二次破碎形成的云雾区中,在固定点测得的颗粒 Sauter 平均直径随时间的推移而减小,最后渐渐趋于稳定。在云雾区的前缘,测得的液滴 Sauter 平均直径随测量半径的增加而增加。

(3)通过对破碎时产生颗粒尺寸的估算,可得液滴在液体轴对称抛撒二次破碎过程中运动速度在 $30 \sim 40 \text{ m/s}$ 之间。

在实验过程中得到杨基明教授、李光华高工、以及潘建平同学等的支持和帮助,特此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Micheal W G. Far-field Dispersal Modeling for Fuel-air-explosive Devices. SAND90-0528, 1990
- 2 Wierzbna A, Takayama K. Experimental Investigation of the Aerodynamic Breakup of Liquid Drops. AIAA Journal, 1988, 26: 1329 ~ 1335
- 3 Hsiang L P, Faeth G M. Drop Deformation and Breakup due to Shock Wave and Steady Disturbances. Int J Multiphase Flow, 1995, 21: 545 ~ 560
- 4 Widdecke N, Klenk W, Frohn A. Impact of Strong Shock Waves on Monodisperse Isopropanol Droplet Streams. In: 20th ISSW. 1995. 89 ~ 94
- 5 朱德忠. 热物理激光测试技术. 北京: 科学出版社, 1990
- 6 Mugele H A, Evans H D. Droplet Size Distribution in Spray. Industrial and Engineering Chemistry, 1951, 43(5): 1317 ~ 1324
- 7 Cai Q J, Han Z Y. An Experimental Investigation of Formation, Deformation and Breakup of a Cylindrical Annular of Liquid. In: Proceedings of 1997 of China-Japan Joint Symposium on Advanced Energy and Transportation Engineering, 1997. 210 ~ 218
- 8 Dobbins R A. Measurement of Mean Particle Size of Sprays from Diffractively Scattered Light. AIAA Journal, 1963, 1(8)
- 9 Robert J H, Webb M J. Measurement of Droplet Size for Wide Range Particle Distributions. AIAA Journal, 1964, 2(3): 583 ~ 585
- 10 Lane W R, Green H L. The Mechanics of Drops and Bubbles. In: Surreys in Mechanics. Cambridge: Cambridge Univ, 1956. 162 ~ 215

CALIBRATION OF MEASURING SYSTEM AND INVESTIGATION OF SIZE BEHAVIOUR OF ATOMIZATION REGION FORMED BY SECONDARY BREAKUP OF LIQUID RING

Cai Qingjun^a, Han Zhaoyuan^a, Wan Qun^a, Zhang Shouqi^b

(a. *The University of Science & Technology of China, Hefei, 230026*)

(b. *China Academy of Engineering Physics, P. O. Box 501, Chengdu, 61003*)

ABSTRACT The secondary breakup is an important phase in the process of dissemination, breakup and atomization of liquid. In this paper, a laser scattering apparatus for measuring liquid droplets and its calibration are introduced. A set of experiments have been conducted in a diaphragmless shock tube, and some experimental data have been obtained. The experimental results show that, at the fixed observing point, the Sauter mean diameter of the liquid drops which were generated by the secondary breakup of liquid annular decreases with the time, the Sauter mean diameter of liquid drops in the front part of atomization region and width of the atomization region increase with the increasing of measuring distance.

KEY WORDS dissemination, secondary breakup, Sauter mean diameter