文章编号：1000-5773(2008)01-0006-05

炸药爆炸作用下液体破碎后颗粒尺寸分布的研究*

胡 栋[1,4]，韩肇元[3]，张寿齐[2]，赵玉华[2]，王炳仁[1]，陈 军[1]，
孙珠妹[4]，蔡庆军[3]，姚久成[3]，董 石[1]

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室，四川绵阳 621900；
2. 中国工程物理研究院，四川绵阳 621900；
3. 中国科技大学力学和机械工程系，安徽合肥 230027；
4. 四川大学高温高压物理研究所，四川成都 610065)

摘要：对液体抛撒的液滴尺寸进行研究在军事和民用上是很重要的，国内刚开始使用激光散射仪开展此项研究工作。利用 R. A. Dobbins 等人的液体颗粒测量技术，研制了一套既简单又实用的测量液体抛撒过程中液滴尺寸的实验装置——激光散射仪。对于激光与液体微粒的相互作用，当微粒的反射与折射和吸收效应可被忽略时，可导出液体微粒对激光散射的光强公式。只要测量激光被微粒散射的光强，就可推算出微粒的 Sauter 平均直径。在使用激光散射仪测量液体抛撒液滴尺寸的实验中，用水代替爆炸抛撒液体，测量结果表明：液体抛撒二次破碎中，在固定位置测量到的云雾区液滴 Sauter 平均直径随测量时间的增加呈现出减小的趋势；而云雾区的宽度则随着与抛撒中心距离的增大而呈现出增加的趋势；云雾区前沿的液滴 Sauter 平均直径随着与抛撒中心距离的增加而呈现出先逐渐增大然后迅速减小的趋势。为便于比较，对燃料抛撒二次破碎进行了回收法测量和数值模拟计算，其测量与计算结果与用激光散射仪测量的结果有较好的一致性。

关键词：激光；散射；液体；抛撒；Sauter 平均直径
中图分类号：O348 **文献标识码**：A

1 引 言

连续相液体由于液体内的湍流、不稳定性发展或气动阻力等因素的作用而发生变形，破碎成丝状或带形等不规则液体单元，因此必须对液体二次破碎成液滴、雾化有清楚的分析和深入的研究。

20 世纪 80 年代，法-德联合研究中心(ISL)利用高速和超高速摄影、闪光照相以及压力计阵列等测试技术对液体燃料和空气混合物抛撒中燃料的反应即燃烧与爆炸进行了瞬态研究[1]。在实验中，他们测量了燃料的速度、液滴的破碎及其直径尺寸分布、运动速度、浓度和汽化等许多重要参数。通过研究燃料蒸发所引起的温度变化，还确定了空气燃料两相混合物的成分。使用这些重要参数可预测受控和非受控诱导的急剧燃烧与爆炸，也可在燃料抛撒系统的计算模型中用作输入数据和标定量。

在立式爆轰管实验中，他们利用摄像技术测定了管子下端、管轴附近云雾区的液滴数密度和液滴直径分布，从而定标光学系统。通过使用芯径为 200 μm 的单根光纤的激光 Doppler 系统实验，测出了冲击波速度。这种方法特别适合外场爆炸实验。

他们更多的研究实验是在开放式场地进行的。实验中用于爆炸抛撒的霰弹有 1.4 L 和 5 L 两种。霰弹使用 0.25 mm 厚的锡制成，内装低爆速、低密度的 50/50PETN 炸药。炸药爆炸抛撒液体时，炸药

* **收稿日期**：2007-03-20；**修回日期**：2007-08-27
基金项目：国家自然科学基金(10172026)；国防科技重点实验室基金；国家 973 项目资助
作者简介：胡 栋(1943—)，男，研究员，博士生导师，主要从事凝聚态物理研究.

爆轰所产生的作用力远大于气动阻力,液体被喷射入空气中。当爆炸力减弱到与气动阻力相当时,液体的运动由这两个力共同作用、共同决定。在气动阻力起作用时,液体产生二次破碎并变成小液滴[2]。

本工作利用 R. A. Dobbins 等人[3]的颗粒特性测量技术,研制了一套较经济的燃料抛撒液滴尺寸测量系统,即激光散射仪测量系统。运用这套系统主要测量了燃料抛撒过程中远场二次破碎液滴的尺寸随距离或时间的变化关系。

2　燃料抛撒液滴尺寸的实验测量

一束激光入射到尺寸大于其波长的液体微粒上,主要发生以下 3 种效应:折射与反射,衍射以及吸收。前两种效应使得光线通过液体微粒时偏离它的原传播方向,散开到其它方向,从而在不迎着光线入射的方向也能看到光,而迎着光线入射方向的光强却有所减弱,将这种现象称作光的微粒散射现象。

如果用激光照射一颗粒或颗粒群,在前方接受它的散射图像将会发现:当波长逐渐缩短时,折射和反射效应占优势而形成一个几何光学图形;相反,当波长逐渐增加时,衍射效应占优势而转化成一个衍射图形;最后在波长相对很长时,将发生瑞利散射。所以,在颗粒尺寸相对光线波长不是很大的情况下(几微米到几百微米),它的散射主要具有衍射效应的性质,也称为衍射散射,可当作衍射问题处理。一般颗粒尺寸比波长大几倍乃至几百倍时都可以这样处理[4]。

对光的微粒散射问题,可以引用光的波动基本方程来描述,再运用有关的物理定律进行求解[5-6]。激光散射法测量二次破碎液滴尺寸的实验装置如图 1 所示,由 He-Ne 激光器产生的激光束,依次经过凹透镜、30 mm 凸透镜、光阑、1.0 m 准直凸透镜,形成一束具有一定横截面积的平行柱形光,这束光穿过液体二次破碎形成的云雾区,被其中的颗粒散射。散射光由 1.81 m 的接受凸透镜会聚在光电阵列采集器上,用光电接受器记录下散射光的光强,然后通过数据线传输到计算机进行处理,从而测出液体二次破碎的液滴 Sauter 平均直径 D_S。

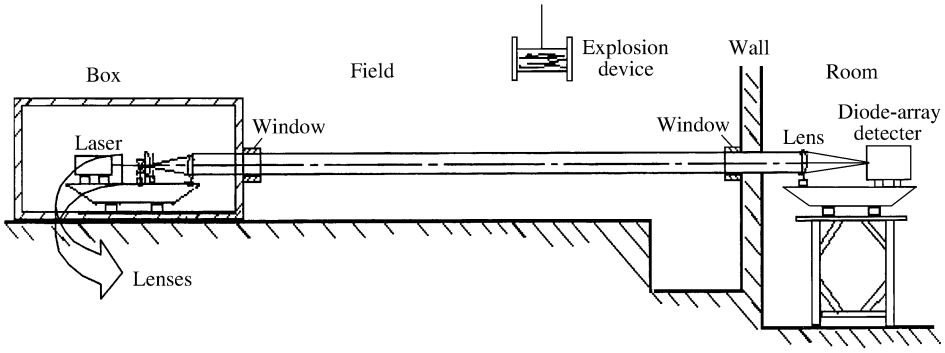


图 1　实验装置示意图

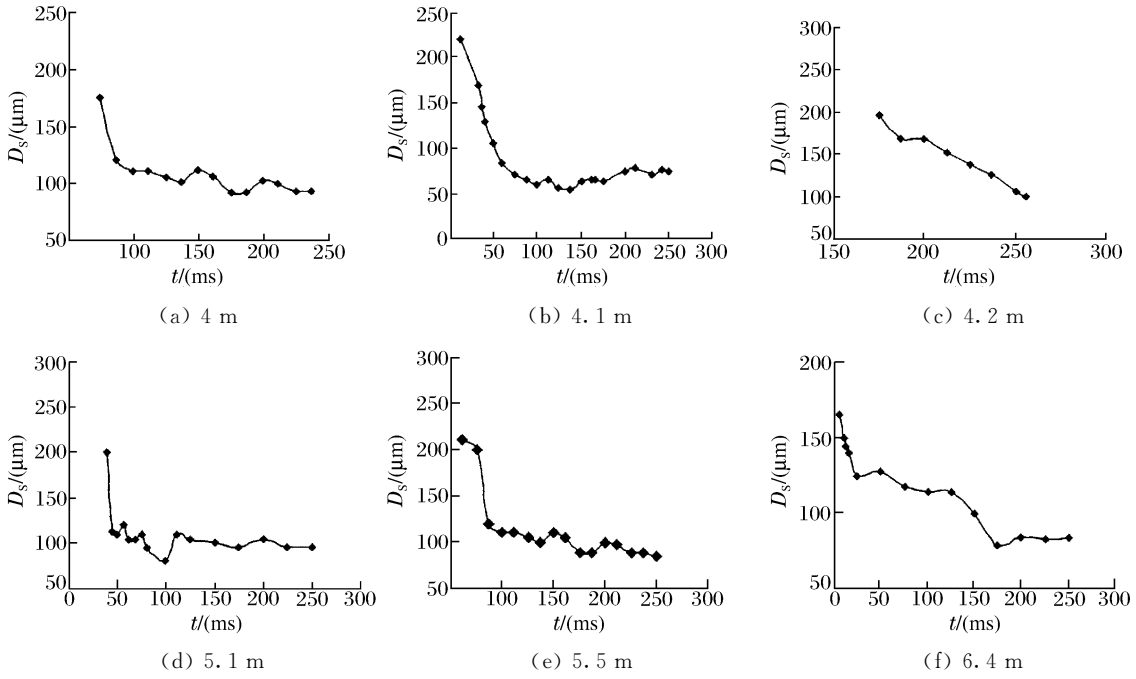
Fig. 1　Experimental schematic

实验时,用 7 L 水代替燃料,爆炸抛撒的炸药量为 150 g 。通过改变爆炸装置的的位置来测量液体抛撒不同距离处的液体颗粒 Sauter 平均直径(SMD)D_S

$$D_S=\frac{\int_0^\infty N_r(D)D^3\,\mathrm{d}D}{\int_0^\infty N_r(D)D^2\,\mathrm{d}D}=\frac{\sum n_iD_i^3}{\sum n_iD_i^2} \tag{1}$$

图 2 给出了利用激光散射法测量出的液体抛撒二次破碎产生的液体颗粒 Sauter 平均直径 D_S 随时间的变化结果。从图 2 中不同距离处的测量结果来看:(1) 在同一测量位置,液滴的 Sauter 平均直径都随测量时间的增加而呈现出从一最大值逐渐减小到一最小值的趋势,最后尺寸变得均匀。(2) 在不同的测量位置,液滴的 Sauter 平均直径的最大值各不相同,随着测量距离的增加呈现出先缓慢增大后迅速减小的趋势,(3) 在不同位置开始测量到的液滴 Sauter 平均直径最大,然后逐渐减小,也就是说,最先到达测量位置的液体微粒中大尺寸的颗粒较多,而最后到达数量较多的是小尺寸颗粒。对于在气体介

质中运动的液体块，阻力系数近似为常数时，其阻力和液体直径的平方成正比，而加速度与直径成反比，定性认为小颗粒受空气阻力作用时的速度要比大颗粒的衰减得快。这样就造成了较大的液体颗粒出现在液体抛撒二次破碎形成的云雾区前缘，较小颗粒出现在云雾区后部。(4) 从图 2(a)～图 2(f)还可发现，液滴 Sauter 平均直径从最大值到开始变得均匀所经历的时间各不相同，液体在被炸药抛撒后的二次破碎过程中形成的液滴除少数直接发生蒸发外，大部分都要返回地面。如果沿抛撒方向放置一些薄膜，那么大多数二次破碎产生的液滴就会被薄膜所收集，再通过测长仪可将这些液滴的直径测出，测量时应考虑液滴的运动方向、下落点等因素。这种方法我们称之为回收法，是一种半定量的方法。



(a) 4 m (b) 4.1 m (c) 4.2 m

(d) 5.1 m (e) 5.5 m (f) 6.4 m

图 2 不同距离处测量结果

Fig. 2 The experimental results at different distances

实验过程中，将燃料的一部分用红墨水代替，另一部分则用水代替。沿红墨水抛撒方向铺放一系列带有编号的 1 m 长的条状薄膜，薄膜用夹子固定在埋于沙堆的铁支架上，为便于与激光散射法测量结果进行对比，我们用回收法中爆炸抛撒炸药量为 150 g、容积为 7 L 的爆炸装置测量结果(注：先把液滴算术平均直径按 Satuer 平均直径定义化为液滴 Sauter 平均直径值)与激光散射法中整个测量时间内的液滴 Sauter 平均直径结果进行比较，回收法和散射法之间的比较见图 3。

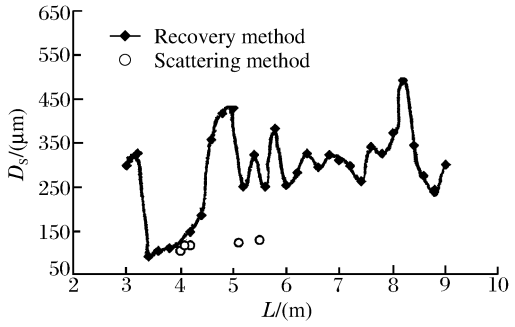


图 3 回收法和散射法的比较

Fig. 3 The comparision of recovery with scattering method

从图 3 看到，激光散射法在 4 m 附近的测量结果与回收法的测试结果符合得较好。这说明依据激光与液体微粒相互作用规律研制的激光散射测试系统有一定的准确性和可靠性。而 5 m 处的结果相差较大，可能是由两方面的原因造成的：一是在回收法中用测长仪测量取样面积中的点时，误把爆炸抛撒扬起的沾有红墨水的沙粒在薄膜上留下的迹斑算在内了，这是回收法误差的一个主要来源，因此回收法具有直观但粗略的优缺点；二是在激光散射法测量中激光器受爆炸作用发生震动以及测量光路中激光被爆炸碎片遮挡而引起测量误差。这正是在进行进一步研究时所要克服的难点。

3　二次破碎的数值计算

前人对液体颗粒的破碎进行了较多研究,并总结出了计算液体颗粒破碎及产生雾滴尺寸的经验公式。研究对象是液体颗粒,观察每个颗粒的运动和破碎过程。1970 年,Reinecke 等人基于实验得到一经验公式,即满足破碎条件的液体颗粒在气动作用下剥落或破碎的质量在破碎时间内的损失率可用正弦函数表示为[7]

$$\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}=-\frac{m_0\pi}{2t_\mathrm{b}}\sin(\pi t/t_\mathrm{b}) \tag{2}$$

式中:m_0 是颗粒的初始质量,t_b 为颗粒的破碎时间。然而从实验知道,在二次破碎过程中液体颗粒的尺寸不断减小,速度不断降低,当液体颗粒达到一定尺寸时,将不再满足破碎需要的 We 数,也就不再破碎。因此,初始质量为 m_0 的颗粒不可能完全破碎,用破碎时间内的质量总损失代替 m_0,则(2)式为

$$\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}=-\frac{(m_0-m_\mathrm{b})\pi}{2t_\mathrm{b}}\sin(\pi t/t_\mathrm{b})=-\frac{m_\mathrm{p}\pi}{2t_\mathrm{b}}\sin(\pi t/t_\mathrm{b}) \tag{3}$$

式中:$m_\mathrm{p}=m_0-m_\mathrm{b}$ 称为液体颗粒质量的总损失,m_b 为液体颗粒破碎完成时的剩余质量。

描述液体颗粒破碎完成后的速度和液体颗粒剩余尺寸的关系已由 Hsiang 等人[8]于 1993 年从实验中获得。雾滴的 SMD 可视为雾滴直径 d_w,得到

$$d_\mathrm{w}=6.2d\left(\frac{\rho_\mathrm{l}}{\rho_\mathrm{g}}\right)^{1/4}\cdot\left(\frac{\mu_\mathrm{l}}{\rho_\mathrm{l}du}\right)^{1/2} \tag{4}$$

这就是液体颗粒二次破碎产生的细小雾滴的尺寸计算公式。式中:μ_l 是液体的粘性系数,ρ_g 为气体密度,ρ_l 为抛撒液体密度,u 和 d 表示液滴破碎时刻在当地的运动速度和直径。

从(4)式可知,计算液体颗粒破碎产生的细小雾滴尺寸需要知道每一时刻液滴运动的速度和位置。因此,必须用传统的理论来计算液体颗粒在静止空气中所受的阻力 f、速度和空间位置的变化。

$$f=-\frac{1}{2}C_\mathrm{D}\rho_\mathrm{g}u^2S \tag{5}$$

式中:C_D 是阻力系数,S 为球的迎风面积,即 $S=\pi d^2/4$。阻力系数 C_D 的选取和颗粒尺寸有关,根据刚性和类刚性体确定。

液体颗粒的运动速度和位置可以通过解下面的运动学方程得到

$$\begin{cases}r=r_0+u_0\cdot\mathrm{d}t+\dfrac{1}{2}\dfrac{f}{m}\mathrm{d}t^2\\[2ex] u=u_0+\dfrac{f}{m}\mathrm{d}t\end{cases} \tag{6}$$

式中:m 为液体颗粒的质量,r 为液体颗粒的运动位置,u 为液体颗粒的运动速度。

通过对(3)式、(4)式、(5)式和(6)式的迭代计算,可算出不同时刻、不同位置处液体二次破碎后的液滴尺寸,计算结果示于图 4 中。由图 4 可以看出,本工作中所用的计算方法可以描述爆炸作用下液体的二次破碎。

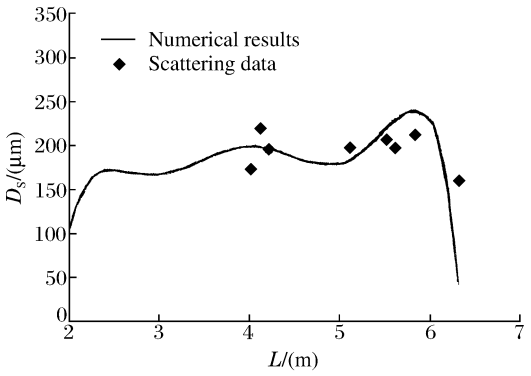


图 4　计算结果和散射法比较

Fig. 4　The comparision of numerical simulation with scattering method

4　结　论

通过一系列的理论和实验研究得到以下结果:

(1) 在实际的燃料抛撒过程中,可以把液体微粒对激光的散射视为衍射散射问题处理。

(2) 在燃料抛撒二次破碎中,在固定位置测量到的云雾区液滴 Sauter 平均直径随测量时间的增加呈现出减小的趋势;云雾区前沿的液滴 Sauter 平均直径则随着与抛撒中心距离的增加而呈现出先增大然后突然减小的趋势。

(3) 通过比较回收法和激光散射仪测量的结果可以看出,在整个测量时间内,液滴 Sauter 平均直径在所测量的一些位置符合得较好,从而间接说明这套激光散射仪有一定的准确性和可靠性。

(4) 燃料抛撒二次破碎的数值模拟计算结果与激光散射仪的测量结果反映的二次破碎规律基本类似。

References:

[1] Samirant M, Smeets G, Baras C, et al. Dynamic Measurements in Combustible and Detonable Aerosols [J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 1989, 14: 47-56.
[2] Popoff I G, Thuman W U. Research Study on the Dissemination of Solid Liquid [R]. US: Stanford Research Institute, 1996: 22-23.
[3] Dobbins R A, Crocco L, Glassman I. Measuremet of Mean Particle Sizes of Sprays from Diffractively Scattered Light [J]. AIAA J, 1963, 1(8): 125-131.
[4] Zabelka R J, Smith L H. Explosively Dispersed Liquids [R]. AD-863268, 1966.
[5] van de Hulst H C. Light Scattering by Small Particles [M]. New York: Wiley, 1957: 186-188.
[6] Newton R G. Scattering Theory of Waves and Particles(2nd ed) [M]. New York: Spriger Verlag, 1982: 97-98.
[7] Zhu D Z. Laser Measurement Techniques in Hot Physics [M]. Beijing: Science Press, 1990: 95-96. (in Chinese)
朱德忠. 热物理激光测试技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1990: 95-96.
[8] Hsiang L P, Faeth G M. Drop Properties after Secondary Breakup [J]. Int J Multiphase Flow, 1993, 19: 721-735.

Studies on the Distribution of Breakdown Liquid Particle Size under Explosive Detonation

HU Dong[1,4], HAN Zhao-Yuan[3], ZHANG Shou-Qi[2], ZHAO Yu-Hua[2], WANG Bing-Ren[1], CHEN Jun[1], SUN Zhu-Mei[4], CAI Qing-Jun[3], YAO Jiu-Cheng[3], DONG Shi[1]

(1. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
2. *China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621900, *China*;
3. *Department of Modern Mechanism, China University of Science and Technology, Hefei* 230027, *China*;
4. *Institute of High Temperature and High Pressure Physics, Chengdu* 610065, *China*)

Abstract: It is important to study liquid particle size in the dispersion in civil and military affairs range. Up to now it is the first time for the liquid particle size in the dispersion to be measured in our country using laser scattering apparatus, under explosive detonation. Based on the analysis on the interaction law between laser and liquid particles and the technique of measuring liquid particle size used by R. A. Dobbins et al, a set of simple and practical apparatus(i. e. laser scattering apparatus) has successfully developed to determine the liquid particle size in the secondary breakup of the fuel dispersion in this paper. For the interaction of laser with liquid particles, we have derived the light intensity formula of scattering on condition of neglecting the effects of reflection and refraction of light and absorption of light. This light intensity formula of scattering allows us to measure the Sauter mean diameter of liquid particles. In our experiment of measuring the liquid particle size in the process of the fuel dispersion, we substitute the explosively dispersed liquid with water. The experimental results show that during the secondary breakup of the liquid dispersion the Sauter mean diameter of liquid particles measured at the fixed position in the atomization area becomes smaller as time increases, the width of the atomization area becomes larger as the distance from the center of the fuel dispersion increases, and the Sauter mean diameter of particles in the front of atomization area decreases rapidly after increasing gradually as the distance increases. To be compared with other experimental results, the liquid particle size has been measured by the recovery method, and a numerical simulation of the secondary breakup of the liquid dispersion has also been performed. The obtained results are in a good agreement with those measured using laser scattering apparatus.

Key words: laser; scattering; liquid particles; dispersion; Sauter mean diameter