

液体环二次破碎所形成云雾区 基本特性的研究*

蔡庆军¹, 韩肇元¹, 万 群¹, 张寿齐²

(1. 中国科学技术大学力学和机械工程系, 合肥 230027;

2. 中国工程物理研究院, 成都 610003)

摘要: 二次破碎是液体抛撒、破碎和雾化过程中一个非常重要的阶段, 这个过程直接影响到雾化液滴尺寸的分布。本文介绍了可移动式无膜激波管工作原理和在这种新实验设备上, 进行光学测量的理论依据和实验结果。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都有所增加。

关键词: 抛撒; 破碎; 液滴; Sauter 平均直径; 光学测量

中图分类号: 0353.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-3124(1999)02-0022-08

An Investigation of Basic Behaviour of Atomization Region Formed by Secondary Breakup of Liquid Ring

Cai Qingjun¹, Han Zhaoyuan¹, Wan Qun¹, Zhang Shouqi²

(1. Department of Modern Mechanics and Engineering

The University of Science & Technology of China, Hefei 230027;

2. China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610003)

Abstract The secondary breakup is an important phase in the process of dissemination, breakup and atomization of liquid. In this paper, a set of experiments have been conducted in a movable 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 decreased with the time, the Sauter mean diameter of liquid drops in the front part of atomization region and with of the atomization region increased with the increasing of measuring distance.

Key words splash; breakup; liquid droplet; Sauter mean diameter; optical measurement

收稿日期: 1998-11-17

基金项目: 中国工程物理研究院院外基金资助项目

作者简介: 蔡庆军 (1971-), 男, 安徽合肥人, 中科大博士研究生。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://>

0 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,对液体抛撒、破碎和雾化的过程都要求有清楚的理解。

通常,液体的破碎过程被分为首次破碎和二次破碎两个阶段(在燃料抛撒形成爆轰云雾的领域称为液体抛撒的近场和远场)^[1]。首次破碎过程是指被抛撒液体刚开始破碎的阶段,同时也是抛撒、破碎中十分重要的过程,因为这个过程是整个雾化过程的开始,控制液体块的延伸范围,并提供以后进一步二次破碎的初始条件。二次破碎是抛撒、破碎和雾化的另一个重要过程,这个过程直接影响到雾化液滴尺寸的分布。在这个过程中,从首次破碎中分裂出的较小液体块在气动力作用下进一步破碎,雾化成很小的液体雾滴。

通常意义上的二次破碎是指 $\rho_l/\rho_g > 500$ (抛撒液体和环境气体密度比大于 500), $Re > 100$ 情况下破碎雾化过程。二次破碎和无量纲的 Weber 数和 Ohnesorge 数有很大的关系,其中 Weber 数代表的是阻力和表面张力之比, $We = \frac{\rho_g d U^2}{\sigma}$; 而 Ohnesorge 数代表的是粘性力和表面张力之比, $Oh = \frac{\mu}{(\rho_g d \sigma)^{1/2}}$ 。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几种破碎形式^[2,3]: $13 < We < 35$, 破碎方式为袋形破碎,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形的结构,最后这样的薄袋从最薄的地方破碎成小液滴; $80 < We < 1000$, 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,而不是盘的中心,最后从盘的边缘剥落下小的液滴;在袋形破碎和剥落破碎之间的破碎形式,即 $35 < We < 80$, 是一种受两种破碎形式影响的复杂混合的破碎形式;此外,在非常大的相对速度下, $We > 1000$, $Re > 500$, 可以看到另一种复杂的破碎形式,通常被称为剧烈破碎或爆炸破碎,液滴颗粒在高速气流的作用下瞬间破碎成小的雾滴^[4]。对于在一定的环境条件下的液体抛撒过程,如果抛撒初期的能量足够大,则液体首次破碎产生的液体颗粒一方面在气动力作用下进行二次破碎,另一方面也在气动阻力作用下降低运动速度,使得液滴的 Weber 数逐渐减小。这样,随着液滴 Weber 数在运动过程中不断的变化,液体颗粒的破碎要随之经历好几种破碎形式。

在液体的首次和二次破碎的研究中,人们已经做了大量的工作,这些工作根据不同的应用方向和破碎机理,可以被分为多种形式。有因湍流发展而导致破碎的压力雾化喷洒破碎^[5];有因不稳定性发展造成液体薄片撕裂的破碎^[6];有因为射流和固壁碰撞而发生溅射的破碎^[7];还有在抛撒燃料以形成爆轰云雾时液体环的破碎^[8]。这些工作对我们理解液体破碎和雾化过程的机理有着重要的意义。

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,国内外的文献中也鲜有介绍。液体轴对称抛撒二次破碎在时间上是个非定常过程,即在固定地点观察到的液体颗粒尺寸随时间的变化而变化,研究液体二次破碎产生颗粒的尺寸变化规律显得十分重要;另外,液体轴对称抛撒

空间大,液体颗粒和气体的相互作用比一般的压力喷洒要更强烈,这就更加深了人们对研究气体相影响液体轴对称抛撒二次破碎的必要性的认识。

在以前的工作中,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^[9]。本文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。

1 实验原理

光线通过含有微粒的介质而偏离了它原传播方向散开到所有方向去的现象称为“光的微粒散射”。造成这种散射的主要原因是由于微粒的反射、折射和衍射效应。

R. A. Dobbins 于 1963 年提出的用光散射法测定颗粒平均直径的方法是一个比较简单而实用的方法^[10, 11]。

Dobbins 依据颗粒散射原理,把满足上限分布函数 (U LDF)^[12]且直径为几 μm 到几百 μm 的颗粒散射作为衍射散射处理,经过推导,可得到光强分布与颗粒尺寸分布的关系

$$i(\theta) = \frac{\int_0^{\infty} \left[\frac{2J_1(T_0 Y)}{T_0 Y} \frac{Y}{Y_\infty - Y} e^{-[W_0 \frac{Y}{Y_\infty} - Y]^2} dY \right]}{\int_0^{\infty} \frac{Y}{Y_\infty - Y} e^{-[W_0 \frac{Y}{Y_\infty} - Y]^2} dY} \quad (1)$$

其中 $i(\theta) = \frac{I(\theta)}{I(0)}$, $I(\theta)$ 为散射光光强, $I(0)$ 为散射光中心光强; Y 是颗粒分布参数,其数值的大小决定分布曲线集中或散开的程度, $Y_\infty = \frac{D}{D_\infty}$, $Y_0 = \frac{D_0}{D_\infty}$, T 是尺寸参数, $T_0 = (\frac{\pi \bar{D}}{\lambda})\theta$; D 和 D_∞ 分别表示最可几直径和最大直径, λ 为光的波长, θ 为散射角。

从公式 (1) 中可以看出,如果已知喷雾的颗粒分布,只要把积分做出来就可得出相对光强分布。反过来,如果测得相对光强分布,如果能解此积分方程,也可以得出 T 和 W , 亦得出颗粒尺寸分布,然而后者是很复杂的。

Robbins 在整理 (1) 式的过程中发现,对不同的颗粒尺寸分布近似地存在唯一的关系,特别是在 $i(\theta) = 0.1$ 的地方,各种不同分布得到的点几乎完全重合^[12, 13]。这说明在相

当大的 Q , $\frac{D}{D_\infty}$ 值范围内 ($Q = 0.5 \sim 2.10$, $\bar{D}/D_\infty = 0.13 \sim 0.8$), 可以认为 $i(\theta) \sim \frac{CD_s}{\lambda}\theta$ 曲线是唯一的,这样就可以利用实验测得的 $i(\theta) \sim \theta$ 关系和理论曲线 $i(\theta) \sim \frac{CD_s}{\lambda}\theta$ 相对应来求

解 D_s 。其中 D_s 为液滴 Sauter 平均直径

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

$N_r(D)$ 是颗粒尺寸的分布函数

激光散射法测量液体颗粒尺寸的光路如图 1 所示,图中光电矩阵可以测得穿过液体颗粒场激光光强分布,并通过数据线输入到计算机中。

在计算机中,从实验得出的 $I(\theta) \sim \theta$ 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 $i(\theta) \sim \frac{\pi D_s}{\lambda}\theta$ 可得到液滴

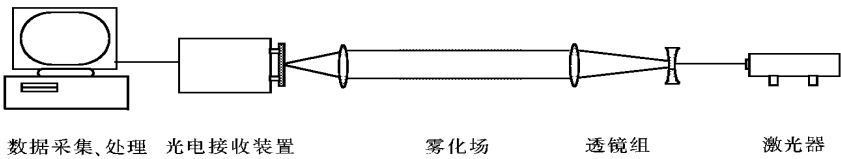


图 1 激光散射法测量液体颗粒尺寸光路

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

的 Sauter 平均直径

2 实验装置

为了实现液体轴对称抛撒,提出一个轴对称 U 型容器与无膜激波管相结合的实验装置^[9],在这个装置上可以形成液体环的轴对称抛撒 为了实现在不同位置测量液体轴对称抛撒二次破碎产生的液滴尺寸,采用了移动垂直无膜激波管的办法,这样可以保证有稳定的光路及其测量结果 如图 2 所示,无膜激波管在一段长 3m 的导轨上可移动,一旦位置确定,激波管将用螺栓被锁定 实验测量的距离是激波管轴心到如图中透镜形成的直角三

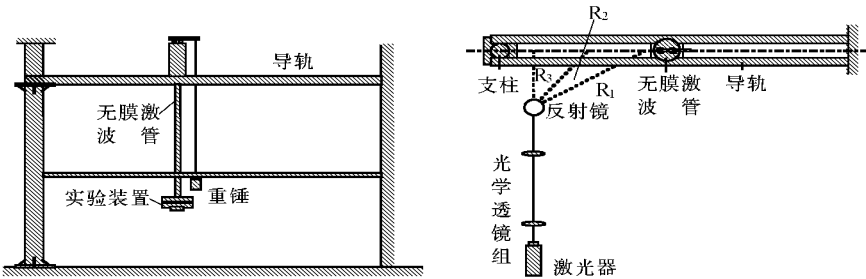


图 2 可移动式无膜激波管工作原理

Fig. 2 A movable diaphragmless shock tube

角形斜边的长度,如图中的 R_1 、 R_2 和 R_3

对于确定的激波管实验位置,测量液体轴对称抛撒二次破碎的液滴颗粒尺寸的光路如图 3 所示 图中 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有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从 0ms 到 250ms 时间范围内的散射光强的变化 实验测得的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

3 实验结果及分析

在本实验中,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

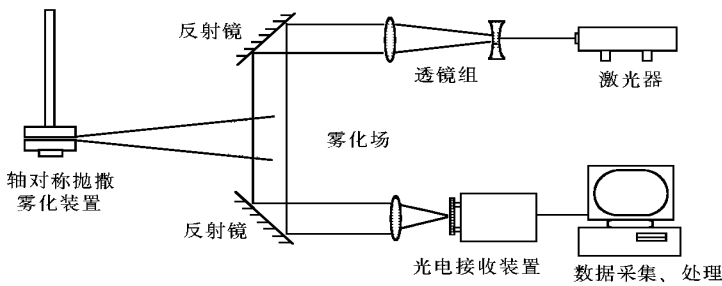


图 3 液体轴对称水平抛撒二次破碎下颗粒尺寸的测量光路
Fig 3 Optical layout for measuring droplet sizes under condition of axisymmetrical secondary breakup of liquid ring

为 0.6M Pa,产生的激波马赫数约为 1.35

图 4为光电阵列的示意图,阵列从 -1~ 14共有 16个光电单元,图中第零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单元为例作为说明
图 5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



图 4 光电阵列示意图

Fig. 4 Scheme of photoelement array

图 5 液体轴对称抛撒形成的环形云雾区

Fig 5 Atomization region formed by dissemination

云雾区的后部和环形云雾区的前缘

图 6(a)为测量点距离抛撒处 45cm 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(b)是距离抛撒处 75cm 时测得的散射光光强随时间的变化。从图中可以看出,散射光光强跃升的时间维持得更长,大约 100ms 左右(原理同上),这表明液体轴对称水平抛撒形成的液滴云雾区的

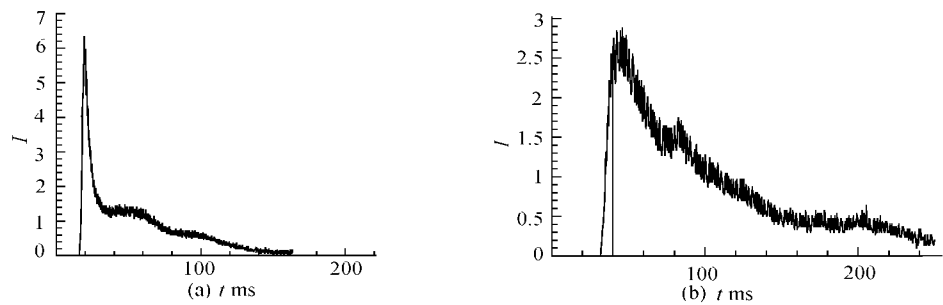


图 6 散射光强随测量时间的变化 (a) 30mL, 测距 45.5cm (b) 40mL, 测距 75.0cm

Fig. 6 The changes in light intensity with time (a) 30mL, 45.5cm (b) 40mL, 75.0cm

宽度随测量半径的增加而增加

图 7 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 7(a)为 30mL 的无水乙醇在离抛撒中心 45cm 处的测量实验结果，图 7(b)为 40mL 的无水乙醇在 75cm 处的测量点抛撒的实验结果。

从图 7(a)中可以看出，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，约为 125 μ m，然后颗粒尺寸随测量时间的延长而逐步减小，最后带小幅波动地稳定在 80 μ m 附近。图 7(b)也比较明显的表现出了相类似的规律。

对于在气体介质中运动的液体块，其阻力和液体直径的平方成正比，因此，小颗粒液滴受空气阻力作用而速度衰减比大颗粒液滴更快。这样就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。随着测量距离的增加，大颗粒的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 5(b)中

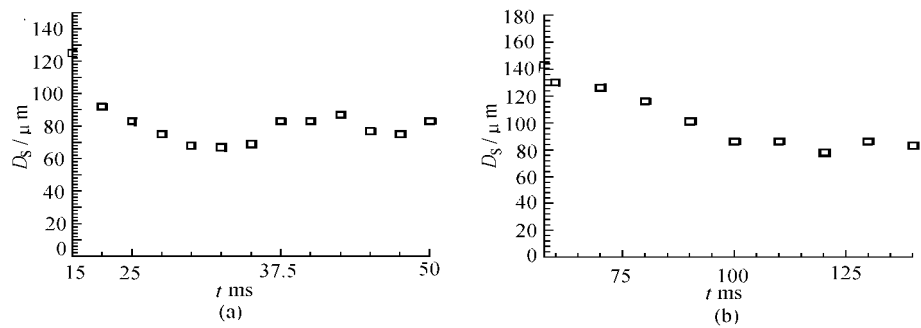


图 7 液滴尺寸随时间的变化规律 (a) 30mL, 测距 45.5cm (b) 40mL, 测距 75.0cm

Fig. 7 The changes in size of particle with time (a) 30mL, 45.5cm (b) 40mL, 75.0cm

云雾区持续的时间较图 5(a)更长的缘故。

从图 7(a)和图 7(b)中还可以看出，虽然随着测量距离的增加，二次破碎产生的环形云雾区前缘的液滴 Sauter 平均直径有所增加，但它们后部的液滴 Sauter 平均直径基本上

没有发生变化,保持在 $80\mu\text{m}$ 左右。这种情况是因为从大的液滴上破碎下来的小液滴 Weber 数已经达不到破碎要求的临界 Weber 数了,故其液体颗粒的尺寸保持了相对的稳定

表 1 给出了在不同的测量位置,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 平均直径值。从表中可以看出,随着测量距离的增加,在环形云雾区的前缘液体颗粒的 Sauter 平均直径在增加

表 1 无水乙醇 30mL, 6atm

测量半径 (cm)	34. 5	40. 0	45. 5	54. 5	64. 5	75. 0
$D_s(\mu\text{m})$	87. 0	107. 0	127. 5	130. 0	141. 0	143. 0

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,随着气动阻力的作用,这些颗粒的速度也渐渐衰减到破碎要求的临界 Weber 数以下,并不再破碎;另一方面,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在减弱,大颗粒液滴的作用增强,得到的 Sauter 平均直径呈增大的趋势。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。

4 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)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,即云雾区的后部 Sauter 平均直径趋于稳定值
- (2)在液体环二次破碎形成云雾区的前缘,测得的液滴 Sauter 平均直径随半径的增加而增加。在不同的测量半径,测得环形云雾区前缘液滴的 Sauter 平均直径大约由 $85. 0\mu\text{m}$ 增加到 $145. 0\mu\text{m}$
- (3)散射光光强随时间变化表明,随着环形云雾区向外运动,它的宽度随时间的增加而增加。

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

参 考 文 献

1 Micheal W. Glass. Far-Field Dispersal Modeling for Fuel-Air-Explosive Devices, Sand 90-0528, 1990

2 Wierzbna A & Takayama K. Experimental Investigation of the Aerodynamic Breakup of Liquid Drops, AIAA J 26, P1329~ 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. and Frohn A. Impact of Strong Shock Waves on Monodisperse Isopropanol Droplet Streams. 20th ISSW. 1995 89~ 94

5 Faeth G.M., Hsiang L-P and Wu P-K. Structure and Breakup Properties of Sprays, Int. J. Multiphase, 1995, 21 99~

127

- 6 Vander Geld C W M and Vermeer H Prediction of Drop Size Distributions in Sprays Using the Maximum Entropy Formalism The Effect of Satellite Formation. *Int. J Multiphase Flow*, **1994**, **20** 363~ 381
- 7 McCreery G E& Stoots C M. Drop Formation Mechanics and Size Distributions for Spray Plate Nozzles, *Int. J. Multiphaseflow*, **1996**, **22** (3) 431~ 452
- 8 David, Gardner R Near-Field Dispersal Modeling for Liquid Fuel-Air Explosives, *Sand* **90-0686**, **1990**
- 9 Cai Q J& Han Z Y. An Experimental Investigation of Formation, Deformation and Breakup of a Cylindrical Annular of Liquid, *Proceedings of 1997 of China-Japan Joint Symposium on Advanced Energy and Transportation Engineering*, **1997**, 210~ 218
- 10 朱德忠. 热物理测试技术. 科学出版社, **1990**
- 11 Mugele H A& Evans H D. Droplet Size Distribution in Spray, *Industrial and Engineering Chemistry*, **1951**, **43**(5): 1317~ 1324
- 12 Dobbins R A. Measurement of Mean Particle Size of Sprays from Diffractively Scattered Light, *AIAA J.* **1**(8)
- 13 Robert J H& Webb M J. Measurement of Droplet Size for Wide Range Particle Distributions, *AIAA Journal*, **1964**, **2** (3) 583~ 585

韩肇元,中国科学技术大学力学和机械工程系,教授.

万 群,中国科学技术大学力学和机械工程系,硕士研究生

张寿齐,中国工程物理研究院,副总工程师.

《流体力学实验与测量》杂志 加入万方数据 (Chinainfo)系统科技期刊群的声明

为了实现科技期刊编辑、出版发行工作的电子化,推进科技信息交流的网络化进程,本刊现已入网“万方数据 (Chinainfo)系统科技期刊群”,向本刊投稿并录用的稿件文章,将一律统一纳入万方数据系统,进入因特网提供信息服务. 凡有不同意见者,请另投它刊. 本刊所付稿酬已经包含刊物内容上网服务报酬,不再另付.

万方数据系统科技期刊群是国家“九五”重点科技攻关项目,截至 1998年底已有 200 种期刊全文上网(网址: <http://www.chinainfo.gov.cn/periodical>),将在近年内增至 1000 种科技期刊. 本刊全文内容按照统一格式制作编入万方数据系统,读者可上因特网进入万方数据系统免费(一年后开始酌情收费)查询检索本刊内容,也欢迎各界朋友通过万方数据系统向我刊提出宝贵意见、建议,或征订本刊.

本刊地址:四川省绵阳市 211信箱,邮政编码: 621000,电话: 0816-2466270, E-mail: qbzcbz@my-public.SC.cninfo.net

《流体力学实验与测量》杂志编辑部 1999-06-10