

具有广泛应用前景的液滴束流技术

钱绍圣 强红军 许贻班

(清华大学工程物理系,北京 100084)

阐述了液滴束流形成的机理,描述了液滴束流发生器的结构。在适当的扰动作用下,可以得到有规律的液滴束流。液滴束流技术已应用于计算机的喷墨输出、高速细胞分类器等,并具有广泛的应用前景。各种应用对液滴束流的性能提出了要求,介绍了测量液滴束流性能的方法及目前达到的水平。

由一连串液滴组成的束流被称为液滴束流,它是由液体的圆柱束流发展而成的。诺贝尔物理奖获得者、英国人 L. 瑞利透彻分析了液滴束流形成的机理并做了液滴束流的很多实验和讨论。例如液滴束流的频率,液滴尺寸,两股液滴束流的碰撞,液滴充电,液滴含尘对液滴束流性能的影响等^[1-3],他是液滴束流理论的奠基人。近代科学技术的发展,尤其是自动控制和电子及计算机技术的发展,使得液滴束流的研究更加深入,人们就液滴束流的形成从理论和实验两个方面进行了细致的研究。对均匀液滴束流的产生及外界扰动在形成液滴束流时作用作了详尽分析,并进行了液滴束流的控制及液滴束流碰撞的实验,还对液滴尺寸、角向弥散、轴向弥散的测量等作了专门的研究^[4-8]。液滴束流技术也日趋完善,已经应用于计算机输出的喷墨打印机、高速细胞分类器、燃油燃烧性能研究、快速化学动力学研究、单分散的气溶胶标准等^[9-11],并且具有广阔的应用前景。例如,由于空间中的液滴束流在一定条件下具有良好的方向性,可在运行的空间飞行器之间无管道也无联接件情况下进行液体或浆料输送;在空间站上利用可回收的液滴束流作为超轻重量散热系统的散热元件;在空间利用可控液滴进行无容器加工,用以生产超净物质^[12]。

一、液滴束流的形成

把水龙头打开后逐渐关小,可以看到圆柱

水束逐渐成为有鼓出亦有收缩的束流,进而发展成为一颗颗液滴组成的束流(见图1)。



图1 液滴束流的形成

在圆柱束流发展为液滴过程中,总是向势能小的方向发展。由于表面张力引起的势能增量是液体表面张力与其表面积增量的乘积,液体表面张力是常数。有鼓出亦有收缩的液束和圆柱液束相比,在相同体积下,前者的表面积要小些,所以细圆柱束流是不稳定的,要发展成为有鼓出亦有收缩的液束;由于表面积与体积比值以球形最小,有鼓出亦有收缩的液束最后发展为呈球形液滴的稳定束流(忽略重力和空气阻力)。

L. 瑞利忽略液体的粘滞性和重力,假设圆柱液束表面的动坐标 r 随时间 t 呈指数增长:

$$r = a + \left(\varepsilon \cos \frac{2\pi}{\lambda} z \right) e^{\beta t}, \quad (1)$$

式中 a 为圆柱液束半径, ε 是扰动幅度,为小量, λ 是两相邻鼓出部分的长度,称为波长, β 是扰动增长率,为正数。 β 值大则圆柱束流发

展为液滴束流的过程快, β 值为零则束流不随时间变化。写出束流的动能及表面张力所引起的势能, 可以证明只有在 $0 < k_0 < 1$ 时, 有鼓出亦有收缩的束流表面比原来的圆柱束流要小, $k_0 = 2\pi a/\lambda$, 称为无量纲波数。瑞利推导了扰动增长率与无量纲波数的关系式:

$$\beta^2 = (T/\rho a^3)[I_1(k_0)/I_0(k_0)](1 - k_0^2)k_0, \quad (2)$$

式中 ρ 是液体密度, T 是液体表面张力, $I_0(k_0)$ 和 $I_1(k_0)$ 分别是零阶和一阶的修正贝塞耳函数。由(2)式可得在 $k_0 = 0.697$ 时(即波长 λ 等于 4.507 倍的圆柱束流直径) β 值为最大, 圆柱束流发展为液滴束流的时间最短, 在 $k_0 = 0$ 及 $k_0 = 1$ 时, β 值均为零。液滴束流的频率 $f = v_d/\lambda$, v_d 是液滴速度, 其大小取决于作用于液体在孔板(或喷嘴)前后的压力差。

瑞利用底部装有圆形孔板的玻璃瓶为容器, 以音叉为扰动源, 用螺钉将音叉固定于安装有水容器的桌子上, 当音叉频率在 $(0.337 - 0.697) \frac{v_d}{2\pi a}$ 区间, 观察到了有规律的液滴束流,

液滴的频率与音叉的频率一致, 和理论结果相符。对容器内的液体或圆柱束流施加周期性扰动, 并且选用合适的扰动频率是产生液滴尺寸均匀、液滴之间距离均匀的基本手段。施加扰动的方式各式各样, 有的将信号发生器的信号经功率放大后接于扬声器上, 扬声器和圆柱束流相隔一间隙, 也有的将经功率放大后的输出接于电振荡器, 再把其固定于装有液体的容器座上。作者采用压电材料的逆压电效应产生周期振荡(如图 2 所示), 信号经功率放大后连接到压电陶瓷片上, 该片安装于喷嘴前充满液体的小室内, 在周期性信号的作用下, 压电陶瓷片产生周期性振荡, 从而使小室内的液体除了受到恒定的压力外, 还受到周期性的压力扰动。也有将压电材料做成其他形状的。周期性扰动大多采用正弦振荡, 也有采用矩形波、振幅调制的^[1,2,5,6,9]。C. Z. Weber 考虑了液体的粘滞性和液滴束流周围的流体密度, 得到

$$\beta^2 + (3\mu k_0^2/\rho a^2)\beta = (T/2\rho a^3)(1 - k_0^2)k_0^2$$

物理

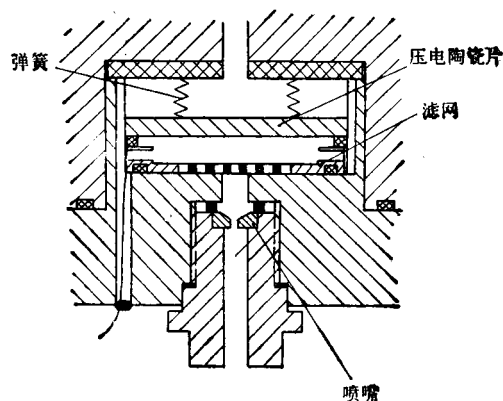


图 2 液滴束流发生器

$$+ (v_0^2 \rho' k_0 / 2\rho a^2)[K_0(k_0)/K_1(k_0)], \quad (3)$$

式中 μ 是液体的粘滞系数, v_0 是流束速度, ρ 是周围流体的密度, $K_0(k_0)$ 和 $K_1(k_0)$ 分别是第二类零阶和一阶修正贝塞耳函数, v_0 和 v_d 的关系是

$$v_d = v_0[1 - (2T/\rho a v_0^2)]. \quad (4)$$

在 v_0 较大时, $v_d \approx v_0$ 。在(3)式右端第二项可忽略的情况下(例如液滴束流射向真空环境), 扰动增长率 β 和无量纲波数 k_0 的关系曲线见图 3。液体的粘性大, β 值下降, 且对应于 β 最大值的 k_0 值也减小。一些实验结果与(3)式大体相符, 为了形成有规律的液滴束流, 在选定扰动频率时, 应考虑有比较大的 β 值^[13,14]。

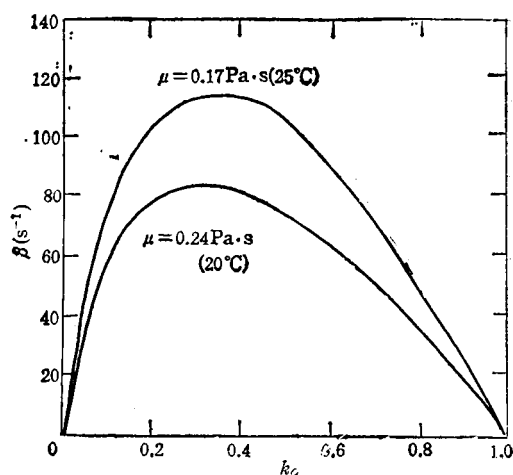


图 3 扰动增长率 β 与无量纲波数 k_0 的关系 (在不同温度下的机械真空泵)

随着液滴束流实验研究的深入,发现有一些实验现象不能用瑞利的线性理论所解释,例如在液滴形成的后阶段,其形状与线性理论有较大差别,在两颗液滴之间常出现小液团现象。M. C. Yuen, K. C. Chaudhary 等发展了非线性理论,简单地讲(1)式改变了,沿流束长度 z 的谐波项采用多项式,随时间 t 也不是单一的指数增长。非线性理论可以解释液滴形成过程,有助于在液滴束流中控制两颗液滴之间小液团的消失^[4,5,7]。不过,瑞利的液滴束流理论反映了液滴束流的基本规律,是液滴束流的基本理论,至今仍为人们广泛引用。

二、液滴束流的应用、性能要求及性能测量

应用液滴束流技术作为计算机输出的喷墨打印机具有其优越性。击打式打印机噪声大,低档击打式打印机价格低,但分辨率也低,激光打印机分辨率高,但价格贵,喷墨打印机价格适中,分辨率较高,噪声低,能实现彩色打印,已有一定的市场。利用喷墨印刷技术还可用于广告牌、包的印刷以及纺织品的印刷上。由于计算机采集、编制及修改图形的灵活和方便,尤其适用于单件及小批量生产。喷墨打印的基本装置如图4所示。墨滴发生器类似于图2,利用静电感应原理,经过充电电极的墨水滴带有电荷,控制充电电极电压大小,使墨水滴带上不同的电荷量,在偏转板的恒电压作用下,电荷量多的墨水滴偏转大,反之就小。通过控制充电量的多少,就可控制墨水滴打印在纸上的位置,不充电的墨水滴直接飞向漏斗并回收。也可以使每颗墨水滴所带电荷相同,控制偏转板的电压大

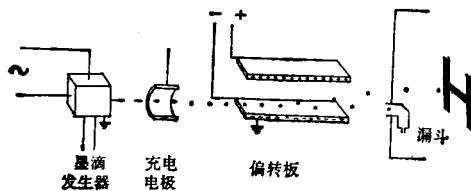


图4 喷墨打印装置原理

小,来达到控制墨水滴在纸上的位置。采用青色、品红色,黄色墨水喷嘴各一个,或者再加一个黑色墨水喷嘴,各自喷出各色的墨水滴在纸上重叠,形成一定色度的像素,实现彩色打印。用于喷墨打印的墨水滴束流要求墨滴小,以提高分辨率。喷嘴的内孔直径通常为几十微米,现在市场上的喷墨打印机其分辨率大约为300—400DPI(每英寸的点数)。应用中不但要求墨滴小,还要求液滴尺寸均匀,即直径的相对标准偏差 $\sigma(d)/d$ 小,其中 d 是墨滴直径, $\sigma(d)$ 是墨滴直径的标准偏差。相继墨滴到达目标(纸面)的时间间隔均匀,或者说墨滴的频率稳定度高也是所要求的,以便墨滴在相应的时刻落在所要求的位置上,对墨水滴束流的另一要求是角向弥散小^[9]。

液滴束流技术也已应用于基于细胞荧光性的高速细胞分类器;荧光由荧光染色或荧光标记抗体的反应所产生。在液滴束中的不同细胞在激光束照射下,被激发的荧光波长不同,对不同荧光波长的细胞充以不同的电荷量,经过施加恒电压的偏转板后,把不同的细胞分开。在这种应用中,要求液滴束流的液滴尺寸均匀,相继液滴之间距离(波长)均匀^[10]。

液滴束流在空间最初应用于水排放和燃油排出,由于空间中存在超高真空和微重力的环境,特别有利于液滴束流的应用。液滴束流的研究过去都集中于射向大气、高压气体或另一种液体,由于液滴和大气的空气动力作用,液滴束流飞行不了多远,就会发生较大的角向弥散和速度弥散^[11,12]。20世纪,80年代开始研究液滴束流在真空中的性能,不同的学者得到一致的结论,液滴束流在高真空中可以做到类似激光那样好的方向性,可能利用液滴束流在空间中进行浆料或液体输送,即在运行的空间飞行器之间,也可以在小目标与空间飞行器或卫星之间。例如,从航天飞机上向正在运行的卫星补充燃料,以便延长卫星运行寿命,图5是航天飞机与小行星或人造卫星之间输送液体或浆料的示意图。这种输送方式不需要管道也无联接件,供料器和料接收器可以相距较远。为实现

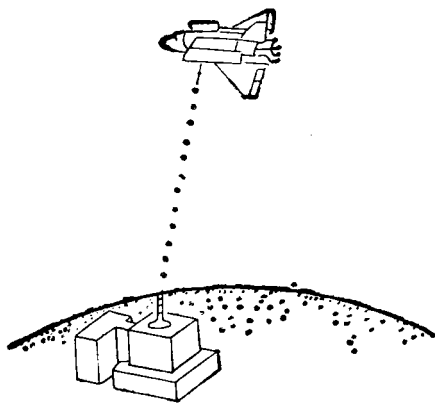


图5 利用液滴束流输送液体或浆料

这种应用,不仅要求液滴形成时液滴大小均匀,波长均匀,还要求液滴束流角向弥散小,轴向速弥散小。液滴轴向速度如果有大、有的小,在液滴飞行一定距离后,液滴会发生无规则的合并、分裂,液滴束流就杂乱无章了。在图6中,树脂束流和固化剂束流按所要求的比例同时射向空间中的施工或修复目标,实施对运行中的空间飞行器施工或修复^[16]。

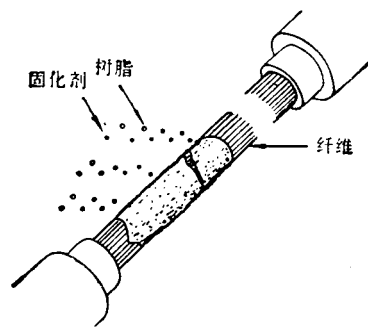


图6 远距离操纵的空间施工或修复

从上述所列举的各种应用中,可以看到对液滴束流的性能要求有这样几个方面,一是液滴尺寸大小合适,且尺寸均匀,二是角向弥散和轴向速度弥散小。目前液滴尺寸已可达几十微米至毫米量级。液滴尺寸的大小可用相对多普勒粒子分析仪测量,仪器的精度为4%;也可用光散射法测量,并能提高测量精度^[17,18]。液滴束流角向弥散的测量通常采用摄取图像法,该方法不足之处是一幅图像上所含液滴数有限。若取相继的多幅图像来增加信息量,由于各幅

图像分别是在各不曝光时间得到的,不是一段连续时间间隔,因而降低了测量结果的可信性。最近已采用液滴束流的阴影落在一组光纤芯上的办法测量出了液滴束流的角向弥散,其角向分辨率达到 10^{-4}rad ^[19]。液滴轴向速度的测量,包括速度值及其标准偏差。激光多普勒测速仪可测量液滴速度,但速度的相对标准偏差约为1%。对于空间中的一些应用,这样的测量精度满足不了要求,近年来测量了相继液滴飞行到测量位置时间间隔的标准偏差,通过标准偏差的传递关系,可得到液滴束流轴向速度的相对标准偏差小于 $10^{-5}-10^{-6}$ ^[18,20]。

液滴束流,一个世纪以前就为当时学者所关注的课题,今天仍然吸引着众多的研究人员。继续减少液滴束流的角向弥散和轴向速度弥散,使液滴束流的方向性更好是人们正在从事的研究方向之一。另一动向是可控多模式液滴束流形成的研究,多模式指的是从一个喷嘴出来的一股束流含有两种或两种以上直径的液滴,并且相继液滴之间的距离也有两种或两种以上,但它们都具有周期性。可控的含意是液滴直径大小及相继液滴之间距离是可以控制的;国外已开始了这方面的研究。随着液滴束流研究的深入,它的应用也将更加广泛。

- [1] L. Rayleigh, *Proc. London Math. Soc.*, **10**(1879), 4.
- [2] L. Rayleigh, *Proc. Royal Soc.*, **34** (1882), 34.
- [3] L. Rayleigh, *Philosophical Magazine*, **34** (1892), 177.
- [4] M. C. Yuen, *J. Fluid Mech.*, **33-1** (1968), 151.
- [5] D. F. Rutland and P. D. McCormack, *Brit. J. Appl. Phys.*, **15** (1964), 743.
- [6] L. Crane et al., *Brit. J. Appl. Phys.*, **15** (1964), 743.
- [7] K. C. Chaudhary and T. Maxworthy, *J. Fluid Mech.*, **96-2** (1980), 275.
- [8] M. Orme and E. P. Muntz, *Rev. Sci. Instrum.*, **58-2** (1987), 279.
- [9] C. L. Cha, *Industrial Research & Developments*, **22-4** (1980), 131.
- [10] W. A. Bonner et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **43-3** (1972), 404.
- [11] R. N. Berglund and B. Y. H. Liu, *Environ. Sci. Tech.*, **7-2** (1973), 147.
- [12] E. P. Muntz and M. Dixon, *J. Spacecraft and Rockets*, **23-4** (1986), 411.

- [13] C. Z. Weber, *Angew. Math. Mech.*, **11** (1931), 136.
- [14] M. Orme, *Phys. Fluids, A*, **3-12** (1991), 2936.
- [15] Shao-Sheng Qian, in *Rarefied Gas Dynamics V, II*, V. Boffi and C. Cerignani ed., B. G. Teuber Stuttgart, (1986), 144.
- [16] E. P. Muntz et al., in *Rarefied Gas Dynamics V, II*, H. Oguchi ed., University of Tokyo Press, (1984), 919.
- [17] L. P. Chin, P. G. LaRose and R. S. Tankin, *Phys. Fluids, A*, **3-8** (1991), 1897.
- [18] K. Anders and A. Frohn, in *Rarefied Gas Dynamics V, II*, H. Oguchi ed., University of Tokyo Press, (1984), 975.
- [19] Shao-Sheng Qian et al., *Rev. Sci. Instrum.*, No. **12** (1992), 5808.
- [20] 钱绍圣等, 宇航计测技术, **12-2**, (1993), 52.

生命科学中的物理问题讲座

第七讲 生物膜液晶模型的若干研究进展

欧阳钟灿 刘寄星

(中国科学院理论物理研究所, 北京 100080)

简述了生物膜液晶模型理论研究的最新进展及其可能的实际应用——用细胞的形状推断细胞的内压与膜电位。

关键词 生物膜, 液晶, 复杂流体, 软材料

Abstract

A brief review is presented of some new results recently obtained on the liquid crystal model of biomembranes. It is shown that the cell internal pressure and the membrane potential of a cell can be determined by the cell shape.

Key words biomembrane, liquid crystal, complex fluid, soft matter

一、液晶与生物膜

自从液晶显示技术在 70 年代崛起, 人们对液晶已不再陌生。一般而言, 大多数棒状有机化合物在适当温度下都显现液晶相。此种介于固体与液体(指各向同性相)的中介相兼有液体与晶体的特征, 这乃是 Lehmann 将它取名为液晶的缘故。液晶按其成分可分为两大类。第一类是由单一成分组成的液晶, 叫热致液晶, 热致的意思是指该液晶相的出现是由于温度变化所致。第二种是由多种成分组成的混合溶液液晶, 称为溶致液晶。顾名思义, 溶致液晶的相变化是由溶液的溶度控制的。应该指出, 溶致液晶也受温度的变化的影响, 所以溶致与热致的划分并非绝对。

法国人 Friedel 把热致液晶分为沿用至今的三大类: 丝状相(nematic)、螺旋状相(cholesteric), 和层状相(smectic)。最后一类的名称 smectic 是取自希腊文, 原意是肥皂。而肥皂的水溶液则是一种溶致液晶, 其结构有一

类与层状相液晶十分相似, 它是由脂肪酸盐分子构成的层与水溶液构成的层相间排列而成, 因而被称为溶致液晶的层状相(L相)。在足够的水溶液的条件下, 脂肪酸盐分子组成的层会逐渐变薄, 最薄时达到只有两个分子层, 这就成为凝聚态物理中研究二维系统现象的一种理想客体。

随着温度的变化, 层状相液晶分子的排列会从垂直于层表面变为倾斜, 其质心在层中的分布也可从无序变为有序(或点阵结构)。因此, 细分之下, 层状热致液晶目前至少已有 14 种亚相被确认, 而分为 S_A, S_B, S_C, \dots 等相。类似的道理, 根据分子在层面上的不同排列, L 相溶致液晶也可分为不同的亚相, 如 L_α, L_β , 等等。如果把肥皂液换为类脂(lipid)液, 所得到的类脂双层膜(lipid bilayer)即是生物膜的原型, 由这种类脂双层膜闭合而成的泡即成为研究生物膜泡的一种模型。实际的细胞膜(membranes of cell)是由磷脂(phospholipid)与蛋白质、酶等组成的分子双层膜结构。用溶