

文章编号: 1001-1455(2003)05-0391-07

瞬态加速液柱的流体力学问题研究*

施红辉¹, 岸本薰实²

(1. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080;

2. 日本名古屋工业大学机械工程系, 名古屋 466-8555)

摘要: 介绍了用激波和压缩气体加速液柱时的流体动力现象的实验研究, 实验中采用了高速摄影技术。研究分为两部分: 第一部分, 液柱在被加速后在管内的气/液两相流的发展以及流出管外后喷雾流的形成, 喷雾流自下而上产生; 第二部分, 气/液界面上的流体力学不稳定性, 即 Rayleigh-Taylor (RT) 不稳定性及 Richtmyer-Meshkov (RM) 不稳定性, 液柱自上而下运动。实验发现, 用此方法产生的喷雾具有流量大、射程远、覆盖面积大等特点。液柱在管内的加速过程中, 上端面保持平面, 下端面在经历了初始的不稳定性之后形成弹状流。在本实验的驱动压力及马赫数的范围内, RT 和 RM 不稳定性的后期的发展过程比较接近, 尽管两者的增长率不同。在 RT 不稳定性的初始阶段, 高密度流体的尖钉先伸入低密度流体中; 但是, 在 RM 不稳定性的初始阶段, 低密度的气泡先伸入高密度流体中。

关键词: 流体力学; 界面不稳定性; 高速摄影; 激波管; 瞬态喷雾流

中图分类号: O354

国标学科代码: 130°2517

文献标志码: A

1 引 言

当一个液滴突然被一股气流加速后, 液体要经历流体力学不稳定性、解裂、雾化等过程, 这些都已是比较熟知的现象^[1]。对这些现象的研究, 不仅具有广泛的工业应用价值(例如内燃机的油喷射、航空航天发动机的燃料雾化、汽车外壳的喷漆等), 而且在流体力学的基础研究上有着重要的学术价值。加速小体积的液体是一件比较容易的事, 但是如果加速大体积(比如 1L)的液体, 在技术上却是一件相当困难的事^[2]。而且因为被瞬态加速的液体的力学行为发生了本质的变化, 问题变得十分复杂。研究如何将大体积液体加速到高速度的方法, 可用于灭火器设备以及农植物的喷药灌溉。作者已系统地研究了用激波管驱动大流量水喷雾的方法^[2~6]。在这些研究中, 在进行流场可视化时, 都是用单次闪光、单次拍照的方法。这里将介绍用高速摄影技术获得的、喷雾流从形成到发展的动态过程。

用激波管加速液柱时的流体力学问题有三个, 一是液柱刚被加速时气/液界面上的流体力学不稳定性, 二是管内的气液两相流, 三是液柱流出管外后液体与空气混合的气动力学。管内的气液两相流不是本文的研究重点, 所以这里只介绍喷雾流和界面不稳定性的研究结果。涉及界面不稳定性, 以 Richtmyer-Meshkov 不稳定性^[7~8]为例, 现有的实验结果大多是气/气界面上的结果^[9~10]。对于气/液界面上的 RM 不稳定性, 还没有发现有详实的实验结果。本文中在研究喷雾流的同时, 还用同一套实验装置研究气/液界面上 RM 不稳定性。

2 实验装置与方法

图 1 为典型的实验装置示意图。装置垂直设置, 主要由三部分组成: 第一, 位于底部的长为 250mm、充满氦气的高压气体室; 第二, 位于中部的长为 250mm、处于大气状态的低压室; 第三, 位于上部的液体容器, 其长度根据设备的运行方式可为 250 或 500mm。三个部分均为内径为 34mm 的圆管。

* 收稿日期: 2002-11-04; 修回日期: 2003-01-20

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金项目

作者简介: 施红辉(1962—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师。

高压室与低压室之间用 $16\mu\text{m}$ 厚的聚脂薄膜隔开, 低压室与液体容器之间用 $15\mu\text{m}$ 厚的铝膜片隔开。实验的水柱高度均为 250mm (体积约为 0.23L)。图 1 中的高压室和低压室组成了一个激波管, 用于驱动液体容器内的水柱。当高压室里的氦气气压超过聚脂薄膜的破开压力时, 在低压室的空气里产生激波。该激波冲击并破开上端的铝隔膜, 然后高压气体将液柱推出液体容器。在本实验中, 所用的聚脂薄膜的破膜压力为 $0.25 \pm 0.005\text{MPa}$ 。总共进行了四种运行方式的实验: (1) 如图 1 所示的激波管方式, 水柱长 250mm , 液体容器长 500mm , 即水柱在到达管端出口之前经历过 250mm 的加速; (2) 激波管方式, 水柱和容器的长度均为 250mm ; (3) 去掉中间段的低压室, 将高压室与液体容器相接的储气瓶方式, 水柱长 250mm , 液体容器长 500mm ; (4) 储气瓶方式, 水柱和容器的长度均为 250mm 。进行四种运行方式的实验, 是为了了解破膜方式 (动态破膜与准静态破膜) 以及管内加速对喷雾流的影响。研究发现, 破膜方式对喷雾流的影响不大^[3,5], 而管内加速对喷雾流的影响显著^[6]。图 1 还给出了进行单张照片拍摄时的可视化系统, 当激波通过设置在低压室里的炭棒时造成它的断裂, 由此产生的脉冲信号触发闪光灯。在进行高速摄影时, 不使用这个可视化系统, 而使用连续光源。摄影机是日本 Nac 公司生产的 MEMRECAM ci-4 型高速磁带摄像机。图 1 中的 Ch1 ~ Ch4 是压力传感器, 用来测量空气和水中的压力信号^[3,6]。

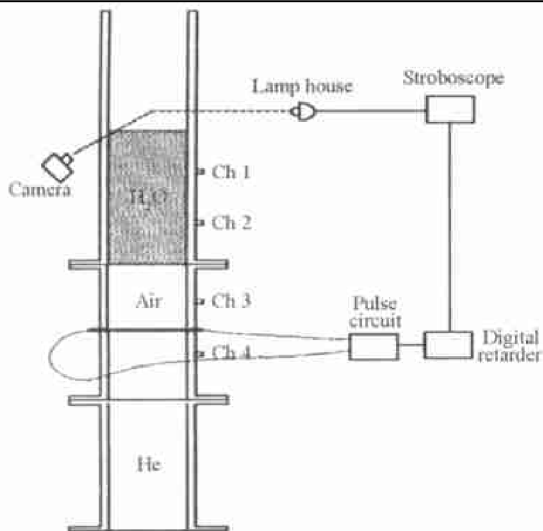


图 1 驱动水喷雾的激波管装置

Fig.1 Hydrodynamic shock tube for driving water spray

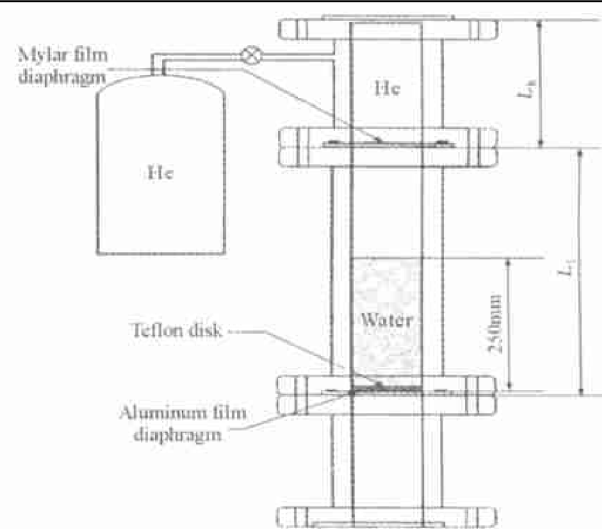


图 2 研究气/液界面上 RM 不稳定性的实验装置

Fig.2 Experimental facility for the study of Richtmyer-Meshkov instability

当激波通过两种不同密度的流体的界面时, 会诱导 Richtmyer-Meshkov 不稳定性^[7,8]。在进行图 1 所示的实验时, 必然出现激波导致的气/液相界面上的 RM 不稳定性现象。为了深入地研究这个问题, 设计了图 2 所示的向下放置的实验装置, 它基本上是图 1 所示装置的倒置。上段是长为 250mm 、充满氦气的高压气体室; 中间段是长度为 $500 \sim 700\text{mm}$ 的透明有机玻璃管, 其中液柱高度为 250mm ; 低段是向大气开放的不锈钢管。三段的内径均为 34mm 。上段和中间段之间用 $15\mu\text{m}$ 厚的聚脂薄膜隔开, 中间段和下段之间用 $15\mu\text{m}$ 厚的铝膜片隔开。在铝膜片上放有一个厚 1cm 的聚四氟乙烯圆盘, 目的是为了使液柱的下端在加速过程中始终保持平面。将图 2 的装置稍加改造, 就可进行 Rayleigh-Taylor 不稳定性的实验。即参照文献[11]的实验方法, 去掉上中两段之间的隔膜, 并在低段中通入高压氦气。然后突然释放低段的压力, 液柱将在压差的作用下向下加速。

液柱获得的加速度, 可由文献[12]介绍的公式算出: $g = \nu A / M - g_0$, 其中 ν 是压差, A 是管的截面积, M 是液体质量, g_0 是重力加速度。可以算出 (忽略 g_0), 进行 RT 实验时, 如果 $p = 0.25\text{MPa}$, 则 $g = 1000\text{m/s}^2$ 。根据 RM 实验的实测得知^[6], 当高压室的隔膜破开压力为 0.25MPa 时, 产生的入射激波马赫数为 1.29 , 从气/液界面上反射回来的激波马赫数为 1.03 ; 由此可算出反射激波后的压力, 也就是液柱上下的压差 $p = 0.086\text{MPa}$, 所以 $g = 344\text{m/s}^2$ 。

3 实验结果

图 3 为第二种运行方式的高速摄影照片 ($f=200\text{s}^{-1}$), 即水柱上端与圆管出口持平。在图 3 (a) 中, 水柱开始流出圆管。在图 3 (b) 中, 液柱头部开始变形向横向扩展。在图 3 (c) 中, 水柱被后续喷出的高压气体迅速雾化^[3,6], 并形成了大直径的液体圆盘。在图 3 (e) 到图 3 (f) 中, 就是离开出口 289mm 处, 这个圆盘发展成雾伞。在图 3 (g) 中, 雾伞头部的离开距离是圆管内径 (34mm) 的 21 倍, 雾伞直径是圆管内径的 15 倍。液柱的从图 3 (a) 到图 3 (c) 之间的流出平均速度约为 10m/s。

如果在液柱流出圆管之前被加速一段距离 (比如 250mm), 可以预计液柱的流出速度将会增加, 而且液体的雾化形态也将随之发生变化。图 4 为第一种运行方式的高速摄影照片。图 4 (a) 中的底部为圆管的出口 (外径 44mm), 此时液柱还未流出。在图 4 (b) 中液柱刚流出管口。从图 4 (b) 到图 4 (c), 液柱的流出速度为 31.4m/s, 液柱的外形基本保持了直径为 34mm 的圆柱体。从图 4 (d) 到图 4 (e), 液柱的直径有所增大, 但是直到流出 918mm (见图 4 (h)), 液体也没有被完全雾化而形成雾伞。

研究发现, 用储气瓶方式产生的喷雾流与激波管方式产生的喷雾流相似, 这证实了以前的研究结果^[3,5]。图 5 为第四中运行方式、当隔膜破开压力从 0.25MPa 增加到 1.3MPa 时的高速摄影照片。此时水柱从带有法兰的不锈钢管出口喷出, 法兰外径 (见图 4 (a)) 为 140 毫米。在图 5 (b) 中水柱刚刚喷出。在图 5 (c) 中, 水柱被后续喷出的高压气体雾

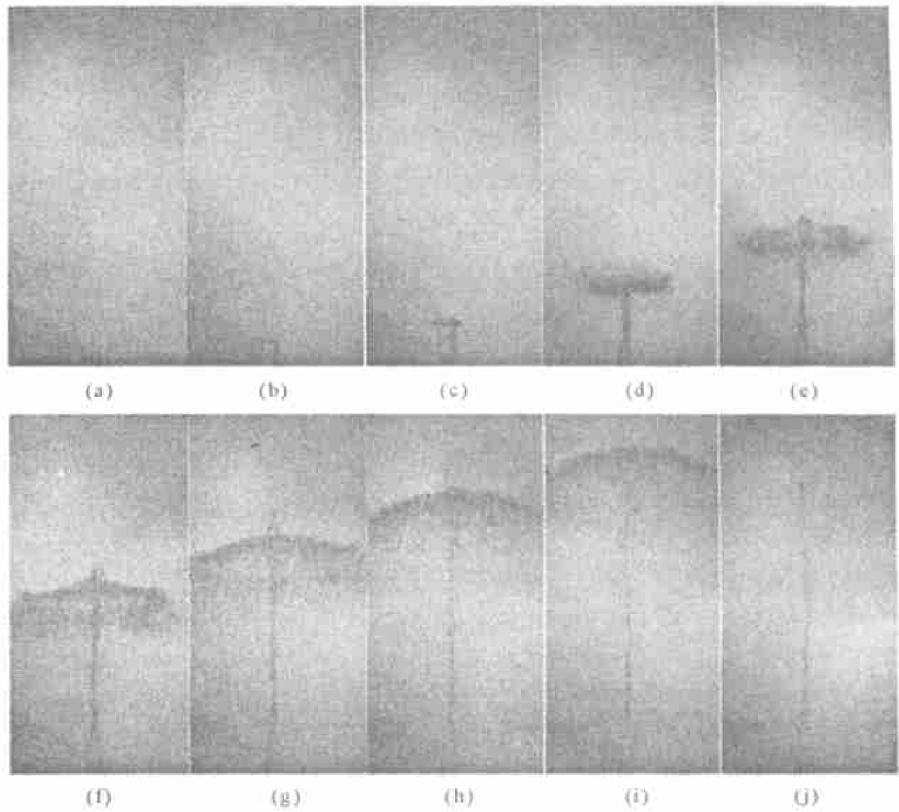


图 3 水喷雾的高速摄影照片 (第二种运行方式, $p=0.25\text{MPa}$, $\Delta t=5\text{ms}$)
Fig. 3 High-speed photographs of spray with large flow rate

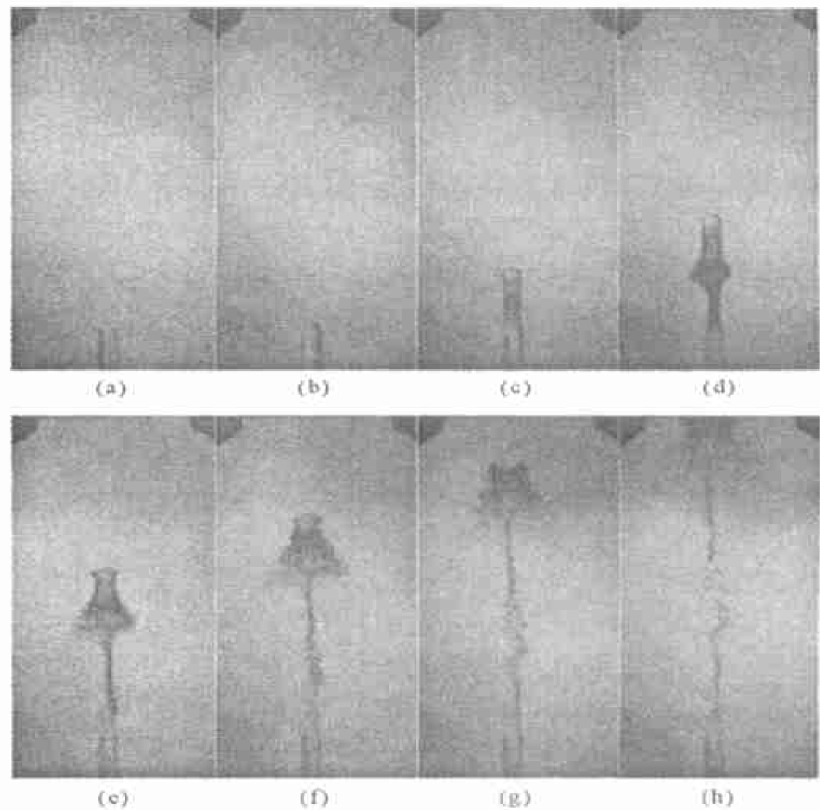


图 4 水喷雾的高速摄影照片 (第一种运行方式, $p=0.25\text{MPa}$, $\Delta t=5\text{ms}$)
Fig. 4 High-speed photographs of spray with large flow rate

化,喷雾流的直径迅速增大。在图 5(b)到图 5(c)之间,水柱的流出速度为约 40m/s。在图 5(d)中,在离开出口的距离为出口内径的 10 倍处,直径为出口内径 13 倍的雾伞已形成。而且从图 5(e)到图 5(f)可以看出,喷雾的水量明显增加,这是因为驱动压力的增加使得较多的液体喷出管内。

根据已有的研究成果^[13], RT 和 RM 不稳定性混合区间的宽度可分别描述为

$$h_i = \alpha_i A g t^2 = 2 \alpha_i A Z \quad (1)$$

$$h_i = \alpha_i t_i^0 \quad (2)$$

式中: Atwood 数 $A = (\rho_1 - \rho_2) / (\rho_1 + \rho_2)$, ρ_1 、 ρ_2 分别是重流体和轻流体的密度。 g 是加速度, Z 是界面移动的距离。下标 i 表示轻流体混入重流体的气泡 ($i = b$) 或者表示重流体侵入轻流体的尖钉 ($i = s$)。 α_i 和 θ_i 是需要确定的常数。尽管 U. Alon 等^[14] 提供了 α_i 和 θ_i 的有关数据,但是如王继海^[15] 所注意到的那样,这些已有的数据比较分散,还没有定论。本文中通过实验来讨论上述公式以及 α_i 、 θ_i 。

图 6 为氦气/水界面 RT 不稳定性的高速摄影照片 ($f = 500s^{-1}$), 液柱自上而下运动。图的右侧为每部分照片在沿圆管下游方向的拍摄位置。图 6(a) 是运动的起始。从图 6(a) 到图 6(d), 水面被向下加速。在图 6(e) 中, 已可看出向上突出的尖钉。图 6(f) 清楚地显示了不稳定性是在整个界面上发展的, 只是尖钉在圆管中心部伸出较长 (见图 6(g)、(h))。经过 18ms, 到了图 6(j), 形成了分辨清晰的气泡和尖钉。根据图 6 的实验结果, 可以计算出液柱实际获得的加速度。因为 $Z = g' t^2 / 2$, 根据从图 6

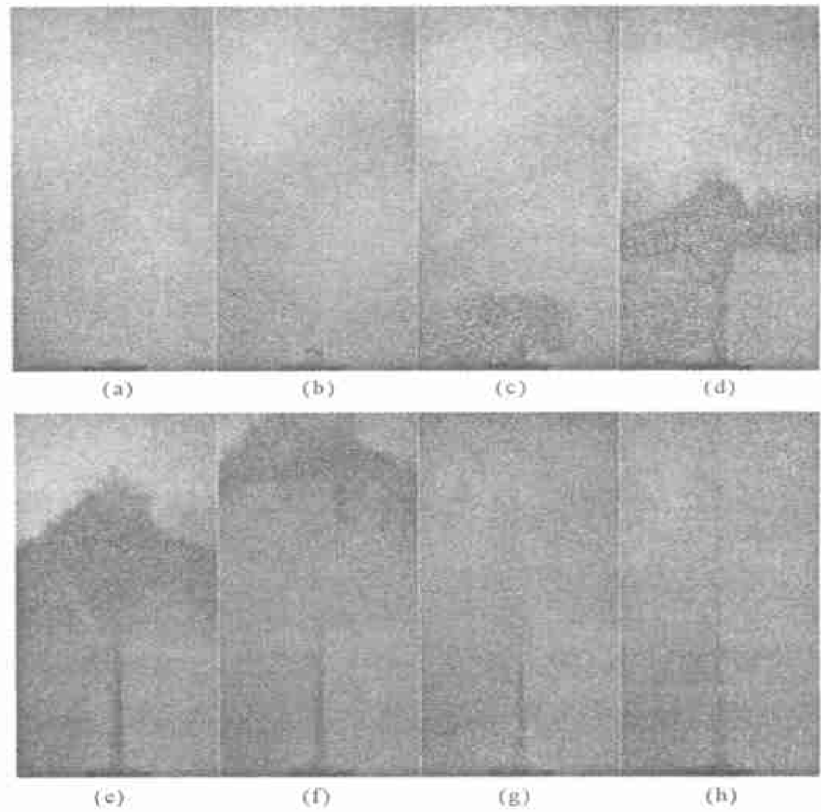


图 5 水喷雾的高速摄影照片(第四种运行方式, $p = 1.3MPa$, $\Delta t = 3ms$)

Fig. 5 High-speed photographs of spray with large flow rate

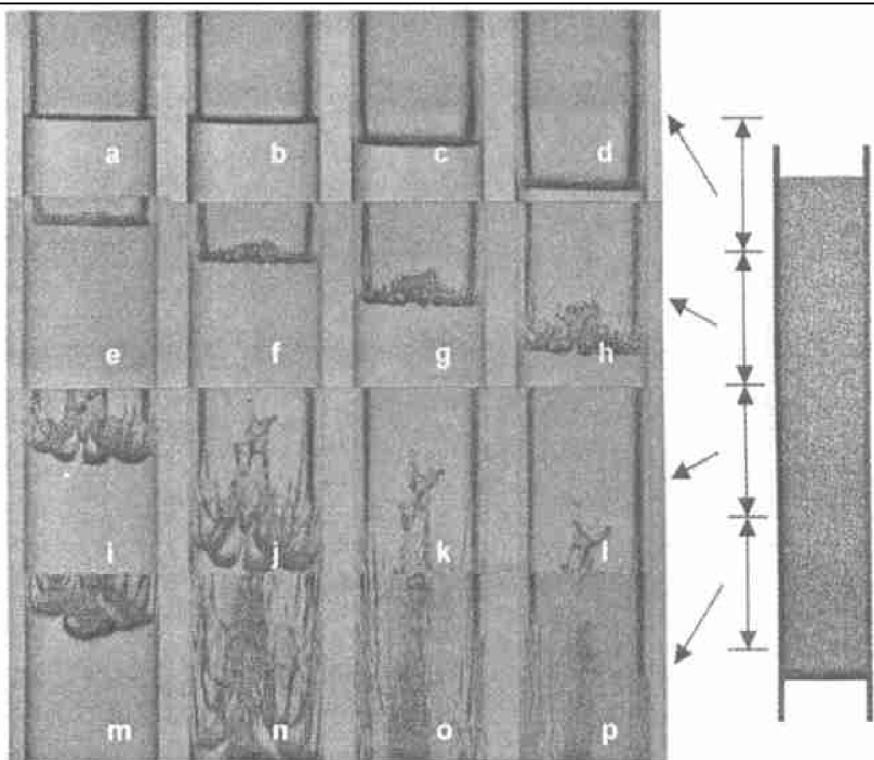


图 6 氦气/水界面上的 RT 不稳定性现象 ($\Delta t = 2ms$)

Fig. 6 Rayleigh-Taylor instability at the helium gas/water interface

可以计算出液柱实际获得的加速度。因为 $Z = g' t^2 / 2$, 根据从图 6

(a)到图 6(d)液面的移动距离 Z 及时间 t , 可以算出 $g' \approx 1000\text{m/s}^2$, 这与前面计算的结果相吻合。再从图 6(j)测出 h_b 和 h_s , 用公式(1)得出 $\alpha_b = 0.0475$, $\alpha_s = 0.126$, $\alpha_s / \alpha_b = 2.65$, 这与 U. Alon 等预测的 $\alpha_b = 0.05$ 和 $\alpha_s / \alpha_b = 3$ 十分吻合。

图 7 和图 8 分别给出了气/丙酮、气/甘油界面 RM 不稳定性的高速摄影照片, 液柱自上而下运动。丙酮的密度、表面张力、粘度分别为: $\rho_1 = 0.73\text{g/cm}^3$, $\sigma = 23.9\text{mN/m}$, $\mu_1 = 0.84\text{mPa}\cdot\text{s}$; 甘油的密度、表面张力、粘度分别为: $\rho_1 = 1.18\text{g/cm}^3$, $\sigma = 63.4\text{mN/m}$, $\mu_1 = 22.5\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。与水的物性的明显的不同之处在于, 丙酮的表面张力只有水的三分之一, 甘油的粘度是水的粘度的二十倍以上。比较图 6~8 可发现, 当发生 RM 不稳定性时, 轻流体先混入重流体中。从图 7 可以看出, 在 2ms 时刻(图 7(b)), 气泡已经出现, 而尖钉要等到 8ms 时刻(图 7(e))才出现。根据从图 7(a)到图 7(f)界面的移动距离和时间, 得出丙酮液柱实际获得的加速度 $g' \approx 509\text{m/s}^2$, 大于原来计算的加速度 $g = 344\text{m/s}^2$ 。同样, 得出甘油液柱实际获得的加速度 $g' \approx 360\text{m/s}^2$; 而从文献[4]的实验结果可以算出, 在相同条件下水柱实际获得的加速度 $g' \approx 579\text{m/s}^2$ 。因此得知, 甘油的粘度增加了甘油与管壁之间的摩擦力, 使得加速度减少。不仅如此, 粘度的增加还使得空气/甘油混合区宽度大幅度减少, 气泡的前缘基本上始终保持球形; 而尖钉的发展受到周围的流体以及壁面的拖拉, 拉出了薄膜状的液体(图 8)。另外, 图 7 中所示的丙酮尖钉的头部形成了一个较大直径的圆盘直径(图 7(g)), 而且头部有被雾化的迹象(图 7(n)到图 7(p))。这些现象与丙酮的低表面张力有关。

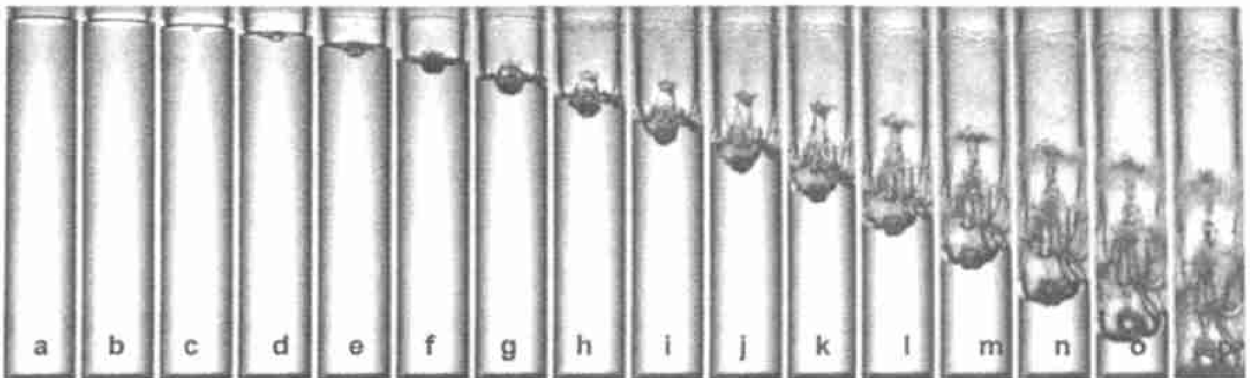


图 7 空气/丙酮界面上的 RM 不稳定性现象 ($\Delta t = 2\text{ms}$)
 Fig. 7 Richtmyer-Meshkov instability at the air/decane interface

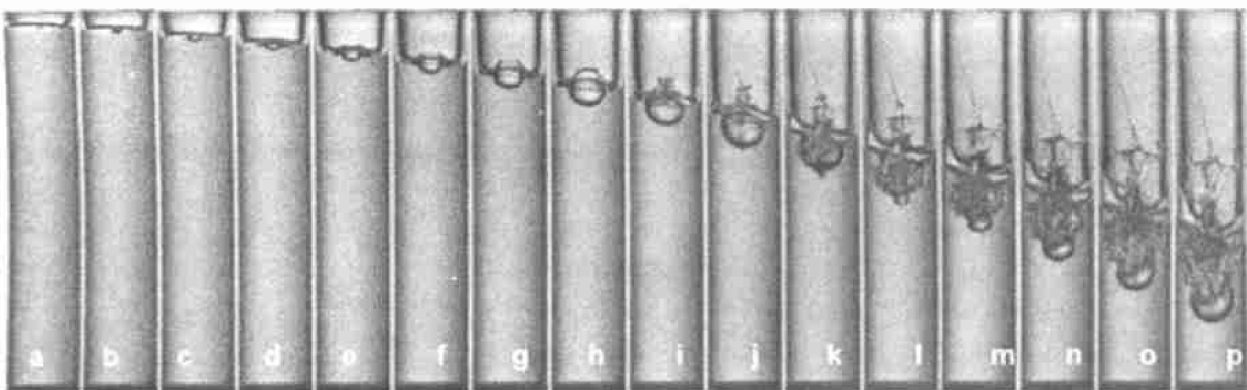


图 8 空气/甘油界面上的 RM 不稳定性现象 ($\Delta t = 2\text{ms}$)
 Fig. 8 Richtmyer-Meshkov instability at the air/glycerin interface

图 9 和图 10 分别给出了测得空气/丙酮、空气/甘油混合区间宽度与时间的关系。在空气/丙酮的情况下, 气泡的深度 h_b 随着时间增加基本呈线性增长, 这与 U. Alon 等预测的 $\theta_b = 0.4$ 的结果不吻合。他们还预测出当 Atwood 等于 1 时, 尖钉的高度 h_s 呈线性增长。但是图 9 却显示, 当 $t > 20\text{ms}$ 时, h_s 才

呈线性增长;当 $t < 20\text{ms}$ 时, $h_s \propto t^{2.323}$ 。在空气/甘油的情况下,图 10 显示:当 $t < 18\text{ms}$ 时, $h_b \propto t^{1.227}$,当 $t > 18\text{ms}$ 时, $h_b \propto t$;当 $t < 20\text{ms}$ 时, $h_s \propto t^{2.269}$,当 $t > 20\text{ms}$ 时, $h_s \propto t$ 。

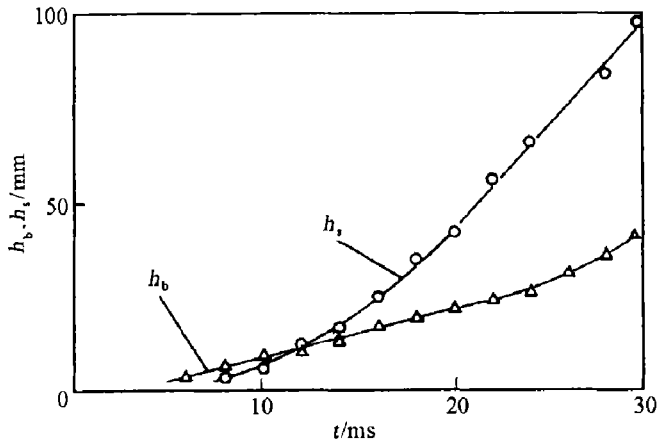


图 9 空气/丙酮混合区间宽度与时间的关系

Fig.9 Relationship between h_i and t of the air/decane mixing region

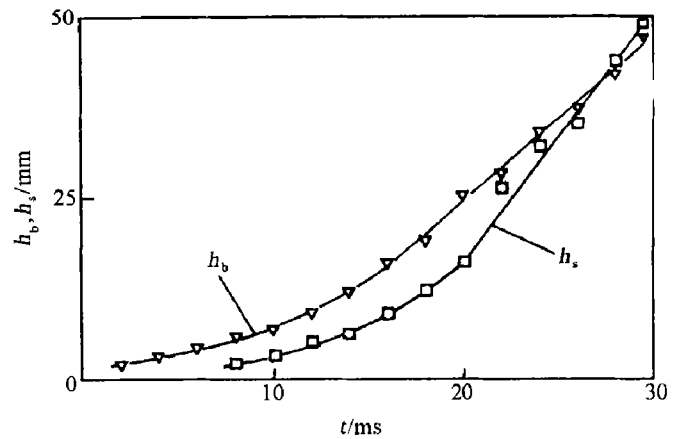


图 10 空气/甘油混合区间宽度与时间的关系

Fig.10 Relationship between h_i and t of the air/glycerin mixing region

4 结束语

利用高速摄影技术详细观察了用激波管及压缩气体产生的大流量的水喷雾,得出如下结论:(1)无论是激波管方式还是储气瓶方式,所产生的喷雾流基本相似。(2)用激波管驱动的水喷雾,能形成大面积的、有较远射程的雾伞。(3)水柱的加速段对喷雾流影响显著,将使得水柱的射程增加。这是因为经过了加速段的助走加速,水柱在管的出口已具有较大的惯性动量。(4)加大喷雾的驱动压力,不但能增加喷雾的速度,而且能增加水量。

在上述工作的启发下,继续研究了在气/液界面上发生的 RT 和 RM 不稳定性问题。对 RT 不稳定性的研究发现,实验测得的混合区宽度的增长系数 α_b 和 α_s/α_b 与 U. Alon 等预测的结果十分吻合。然而,对 RM 不稳定性的研究发现,实验测得的气泡深度 h_b 、尖钉高度 h_s 与时间的变化关系,与 U. Alon 等预测的结果有许多的不吻合。一般地,根据时间段的不同,有线性关系 $h_i \propto t$ 或幂函数关系 $h_i \propto t^{\theta_i}$,但 $\theta_i > 1$ 。实验还发现,改变液体的粘度、表面张力,能影响到液柱加速度、气泡和尖钉的生成形态和它们的增长速度。

参考文献:

- [1] Joseph D D, Belanger J, Beavers G S. Breakup of a liquid drop suddenly exposed to a high-speed airstream [J]. Int J Multiphase Flow, 1999, 25: 1263-1303.
- [2] WANG Xiao-liang, SHI Hong-hui, Itoh M, et al. Flow visualization of high-speed pulsed liquid jet [A]. Proc SPIE [C]. 2000: 899-906.
- [3] SHI Hong-hui, WANG Xiao-liang, Itoh M, et al. Acceleration of water column and generation of large flow rate water spray by shock tube [J]. JSME Int J Ser B, 2001, 44(4): 543-551.
- [4] WANG Xiao-liang, Itoh M, SHI Hong-hui, et al. Experimental study of Rayleigh-Taylor instability in a shock tube [J]. Jpn J Appl Phys, 2001, 40(11): 6668-6674.
- [5] SHI Hong-hui, WANG Xiao-liang. Hydrodynamic shock tube for quick transportation of spray with large flow rate [J]. Experiments in Fluids, 2002, 32(2), 280-282.
- [6] 施红辉, 王晓亮. 用激波管驱动水喷雾 [J]. 流体力学实验与测量, 2002, 16(4): 13-17.
SHI Hong-hui, WANG Xiao-liang. Using shock tube to drive water spray [J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2002, 16(4): 13-17.
- [7] Richtmyer R D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids [J]. Commun Pure Appl Math, 1960, 13:

297—319.

- [8] Meshkov E E. Instability of the interface of two gases accelerated by a shock wave [J] . *Fluid Dynamics*, 1969, 4: 101—104.
- [9] Prestridge K, Rightley R M, Vorobieff P, et al. simultaneously density-field visualization and PIV of a shock-accelerated gas curtain [J] . *Experiments in Fluids*, 2000, 29: 339—346.
- [10] Prasad J K, Rasheed A, Kurmar S, et al. The late-time development of the Richtmyer-Meshkov instability [J] . *Physics of Fluids*, 2000, 12(8): 2108—2115.
- [11] Lewis D J. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes— II [J] . *Proc Roy Soc London Ser A*, 1950, 202: 81—96.
- [12] Jacobs J W, Catton I. Three-dimensional Rayleigh-Taylor instability: Part 2, Experiment [J] . *J Fluid Mech*, 1988, 187: 353—371.
- [13] Zhou Y. A scaling analysis of turbulent flows driven by Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov instabilities [J] . *Phys Fluids*, 2001, 13(2): 538—543.
- [14] Alon U, Hecht J, Ofer D, et al. Power law and similarity of Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov mixing fronts at all density ratios [J] . *Phys Rev Lett*, 1995, 74(4): 534—537.
- [15] 王继海. 二维非定常流和激波 [M] . 北京: 科学出版社, 1994.

Fluid mechanics in the transient acceleration of a liquid column

SHI Hong-hui^{1*}, Kishimoto Masami²

(1. *State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*

2. *Department of Mechanical Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya 466-555, Japan*)

Abstract: This paper presents some new experimental results of using shock tubes to drive water spray with large flow rate. High-speed photography was extensively used in the experiments. Water columns were vertically accelerated upwards from shock tubes under four different kinds of operation conditions. It is found that the increase in the driving pressure will increase not only the velocity of the spray but also the amount of the liquid. It is also confirmed through the present study that (1) the rupture method of the diaphragm (dynamic or quasi-static) is not important in the spray generation; (2) The acceleration of liquid column before flowing out of the tube has a significant effect on the spray generation. Inspired by the above research, the Rayleigh-Taylor (RT) and Richtmyer-Meshkov (RM) instabilities at gas/liquid interfaces were also studied by accelerating liquid columns vertically downwards. It is found that in RT instability the coefficients of the mixing region $\alpha_b = 0.0475$ and $\alpha_s / \alpha_b = 2.65$, and in the RM instability, the width of the mixing region h_i is time dependent with either a linear relationship $h_i \propto t$ or a power law $h_i \propto t^{\theta_i}$, where $\theta_i > 1$. Surface tension σ and viscosity μ of the liquid affect the formation of the bubbles and spikes.

Key words: fluid mechanics; interface instability; high-speed photography; shock tube; transient spray

* Corresponding author; SHI Hong-hui

Telephone: 010-62548133