



CSTAM 2012-B03-0163

基于肥皂膜技术的气体界面生成与不稳定性研究

罗喜胜，王明虎，王显圣

中国科学技术大学近代力学系

第七届全国流体力学学术会议

2012年11月12—14日 广西·桂林

基于肥皂膜技术的气体界面生成与不稳定性研究¹⁾

罗喜胜²⁾, 王明虎, 王显圣

(中国科学技术大学近代力学系, 安徽省合肥市 230026)

摘要 本文根据肥皂膜的特性, 发展了两种技术, 成功生成了多边形、多模及单模界面, 并在激波管中研究了多类界面不稳定性的发展演变。采用多根细针约束来克服表面张力带来的尖角附近的奇异性, 形成了矩形、三角形及菱形界面, 并以此为基础形成了方波、锯齿波及梯形波等多模界面。采用雕刻形成模具拉伸形成了单模界面, 由于该界面具有最小表面特性, 并呈现出三维性。通过高速纹影观测到了这几类界面在平面激波冲击下的发展演化, 并与数值结果进行了对比分析, 证实本文气体界面生成技术的可行性。

关键词 肥皂膜, 气体界面, 不稳定性

引言

当激波作用于不同密度的物质界面时, 界面将获得有限的加速度, 界面上的扰动会逐渐演化发展, 最终出现不断扩展的湍流混合层, 这就是 Richtmyer-Meshkov (RM) 不稳定性问题[1,2]。RM 不稳定性问题是一种十分复杂的多尺度强非线性物理问题, 是高能密度物理研究的主要内容之一, 在天体物理、惯性聚变能源、水中炸药爆炸、航天火箭发动机、国防尖端武器等领域有着重要而广泛的研究背景。

自从上个世纪六十年代初明确提出 RM 不稳定性问题以来, 对于该问题的研究至今已经有半个世纪的历史, 相关研究水平正在不断提高。《流体力学年评》杂志在 1999 年、2002 年、2005 年、2011 年分别有专门的综述性文章讨论 RM 不稳定性与湍流混合问题[3-6]。随着未来对于实验现象和数值模拟工作深入研究的需要, 以及目前超级计算机计算能力和精密光电诊断技术的迅速发展, 国际学术界越来越重视 RM 不稳定性方面的研究工作。当前国际上关于 RM 不稳定性实验研究方法主要采用激波加载流体界面。作为基础性研究课题, 美、英、俄、法等核武器单位以及部分高校、研究院开展了大量的激波管实验研究界面不稳定性。这类实验运用高速摄影、纹影、粒子图像测速和激光诱导荧光等光学测量技术, 在激波

管中对流体介质的 RM 不稳定性发展过程进行测量, 获得精确的实验结果利用激波管设备开展 RM 界面不稳定性的实验研究包括三部分: 激波的产生、初始流体界面的形成、流场测试分析方法。本文主要介绍我们在界面生成方面的一些工作。目前, RMI 实验中的界面生成有无膜和有膜两种技术。无膜技术主要有两类实现方法。一类是利用气体喷射形成气帘或气柱。这种方法形成的初始界面稳定且扰动小, 因而有着比较广泛的应用。但是由于界面是由气体喷射形成的, 因此界面本身有一定的运动速度, 界面边界处也更容易扩散, 影响实验精确度。另一类无膜技术是用一定的机械手段分隔实验气体, 比如 Brouillette 的快速抽平板方法[4]和 Jones 的竖直激波管方案[7]。这样的方法界面处气体扩散比较严重而且装置一般较为复杂。有膜技术也有两类, 分别采用固体膜和液体膜。固体膜一般为聚合高分子薄膜材料。前述 Erez[8]的研究表明薄膜材料会影响实验结果。液体膜一般为肥皂膜。本文工作是用肥皂膜形成不同形状界面的。其优点是装置简单, 成本低廉, 界面薄, 实验重复性好, 结果受界面影响小。

1 界面生成

不同流体界面的形成是研究界面不稳定性十分重要的环节, 简单的球形界面可以依赖于

1) 基金资助项目: 国家自然科学基金 10972214

2) Email: xluo@ustc.edu.cn

液体的表面张力的作用直接吹制，但一般来说，静态的肥皂膜界面易碎且形成的形状有限，主要有球形与圆柱形。

1.1 多变边形界面

关于肥皂膜界面，Isenberg[9]于 1992 年出版的 *The Science of Soap Films and Soap Bubbles* 一书中有详细介绍。需要注意的一点是肥皂膜界面折线处的设计。肥皂膜可以在诱导丝引导下形成有拐角的界面，诱导丝处可以有 1、2 或 3 道界面。为满足最小表面能条件，任意两道界面之间的夹角必须大于或等于 120° ，否则两道界面可能合并成一道并在其他地方分叉。我们

根据肥皂膜这一性质，在相隔 20mm 的两块玻璃之间预定形状四个顶点各用间距很小的两个细针控制肥皂膜的形状，然后中央吹肥皂泡，待肥皂膜和针粘结后，用抽吸肥皂泡中的气体以降低泡中压力，使相邻两根针的肥皂膜由弧形变为平面，用这种方法成功在激波管实验段中生成了各种气体界面，如图 1 所示。采用肥皂膜拉伸的方法来构造初始扰动界面。相比与之前的用硝化纤维膜来制造出初始界面，用肥皂膜构造初始界面可以很大程度上降低膜破裂后的碎屑对实验结果的影响，并且不会影响到实验流场的测量。

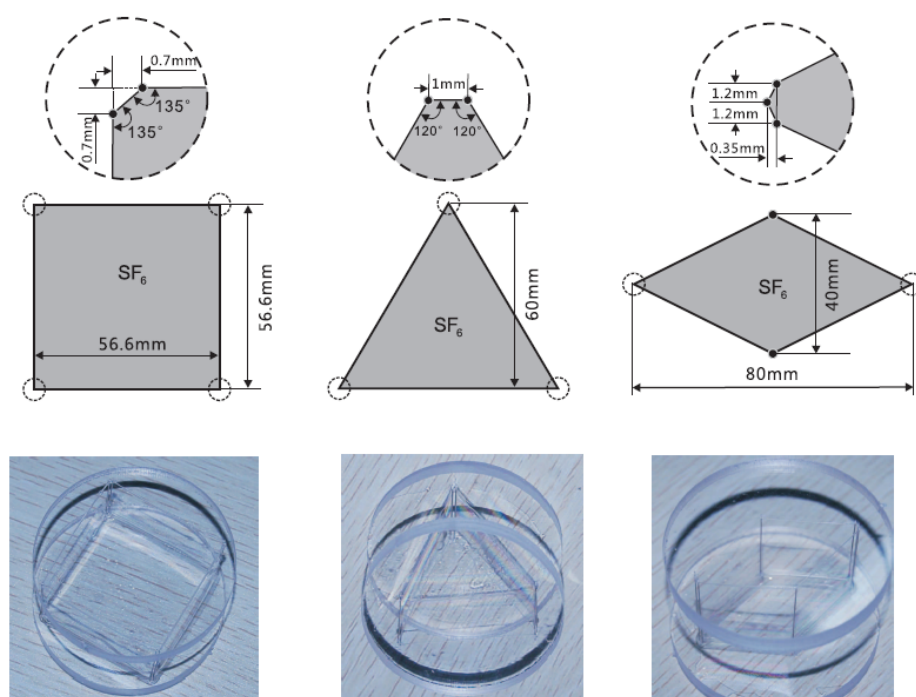


图 1 三种不同气体界面结构（上）和模型（下）：方形（左），等边三角形（中）和菱形（右）。

1.2 多模界面

采用上面的技术，我们还可以构造出多模界面，如由三角形，梯形、方形构成的多模界面等，如图 2 所示。

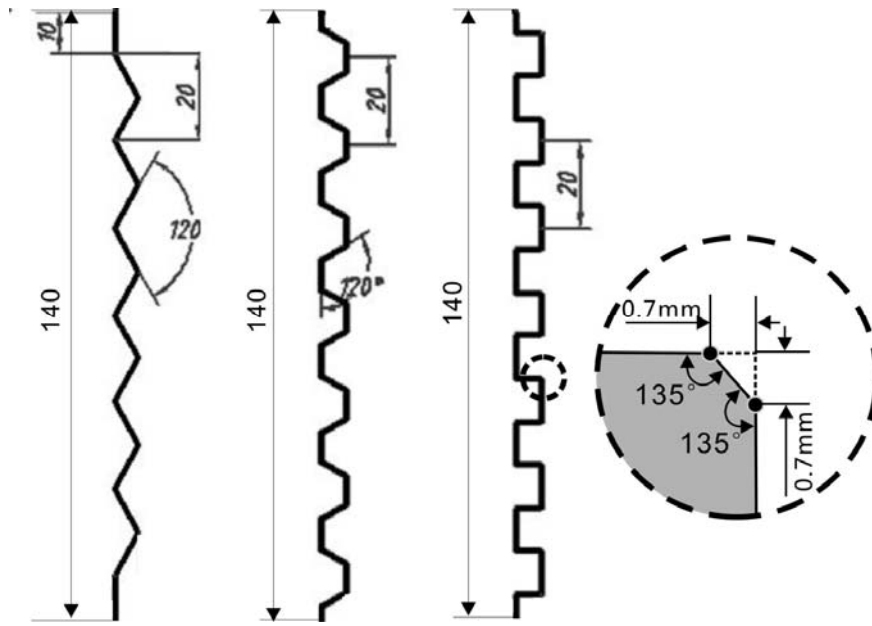


图 2 三种初始多模界面示意图：锯齿形、梯形与方形（单位：mm）

1.3 单模界面

利用肥皂膜还可以生成单模界面。与一般的单模界面不同的是，肥皂膜生成的单模界面初始状态可控，重复性更好。实验中，我们采用模具来约束肥皂膜。模具分为上部和下部两块塑料板块。板块上已经事先雕刻好所需要的

界面尺寸。将两块板上的正弦雕刻纹路用肥皂液浸润，当肥皂液量达到所需量时，轻轻拉动板块使得两个塑料板远离，在两个模板正弦雕刻纹路之间便可以拉出一层肥皂膜界面。

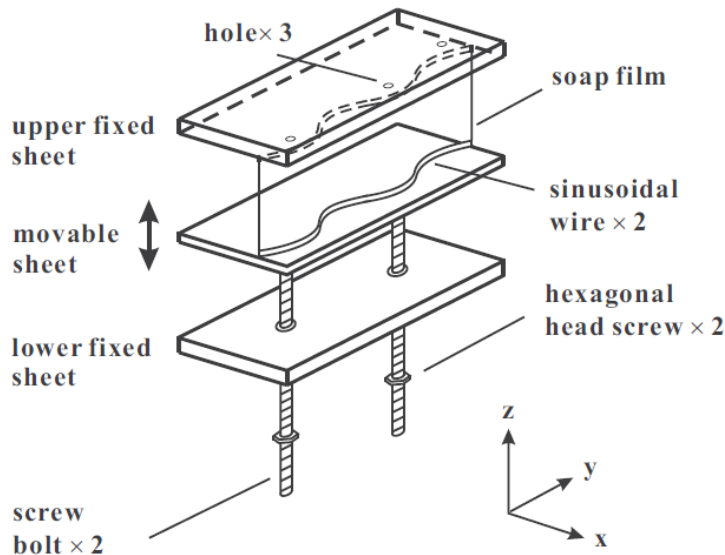


图 3.生成单模肥皂膜界面装置示意图

2 实验方法

实验在尺寸为 $40\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 的方形截面激波管中进行。激波管高压段长度为 1.7 m ，

低压段长度为 3.9 m 。图 4 给出了实验的原理。高速纹影法包括一个直流光源、一套 Z 型

1) 基金资助项目：国家自然科学基金 10972214

2) Email: xluo@ustc.edu.cn

纹影光路（5°折角，包含凹面镜、凸透镜、刀口、狭缝等仪器）以及一个最大拍摄速度可达1百万幅每秒(fps)的高速摄影机（FASTCAM SA5, Protron Limited）。时序和触发控制系统

包括一个四通道延时器(DG645, Stanford Research Systems)、两个固定在激波管壁上的压力传感器、一个电荷放大器、一个示波器以及其它辅助设备。

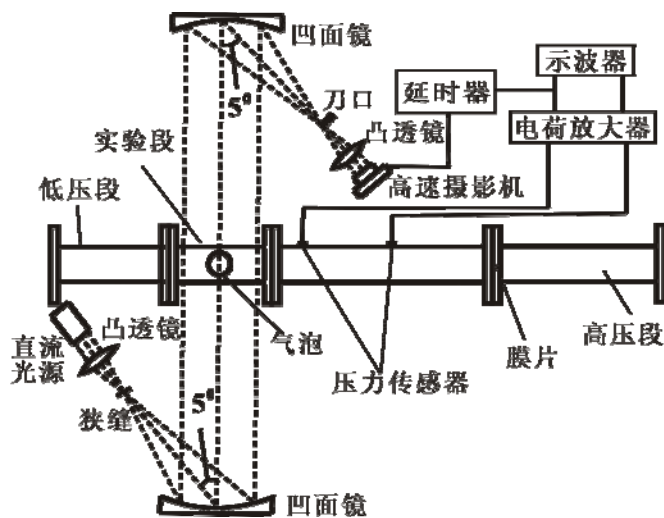


图4 实验原理图

3 结果

多边形界面观测结果如图 5 所示，可以看到生成的气体界面结构简单，干净清爽，肥皂膜的

厚度薄，且具有良好的二维性。与计算模拟结果比较，可以发现两者的波系结构与演化几乎完全一致，界面演化也基本相同，只在上游界面通过下游的细针时，界面形状有明显不同，如图中 A,B,C 三处所示。

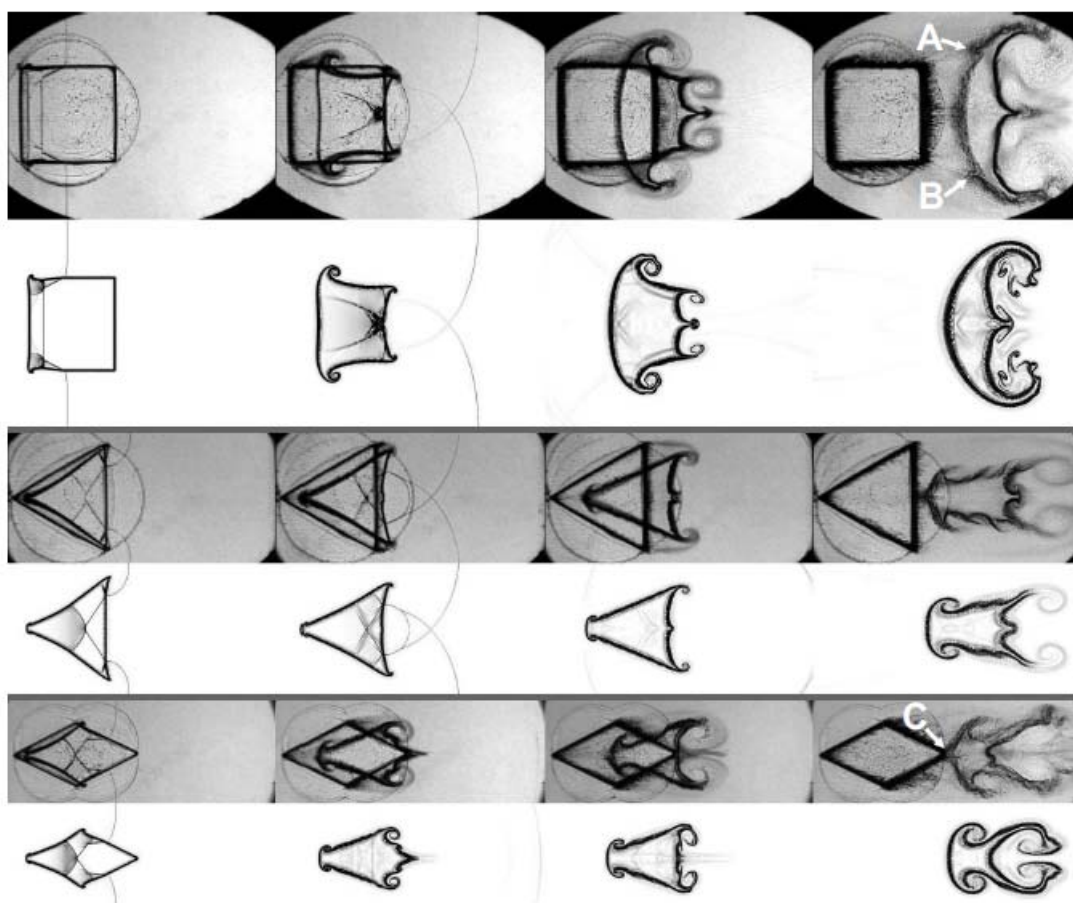


图 5 激波冲击矩形（上）、三角形（中）和菱形（下）SF6 界面的高速纹影与数值模拟对比。
多模界面实验结果如图 6,7,8 所示。

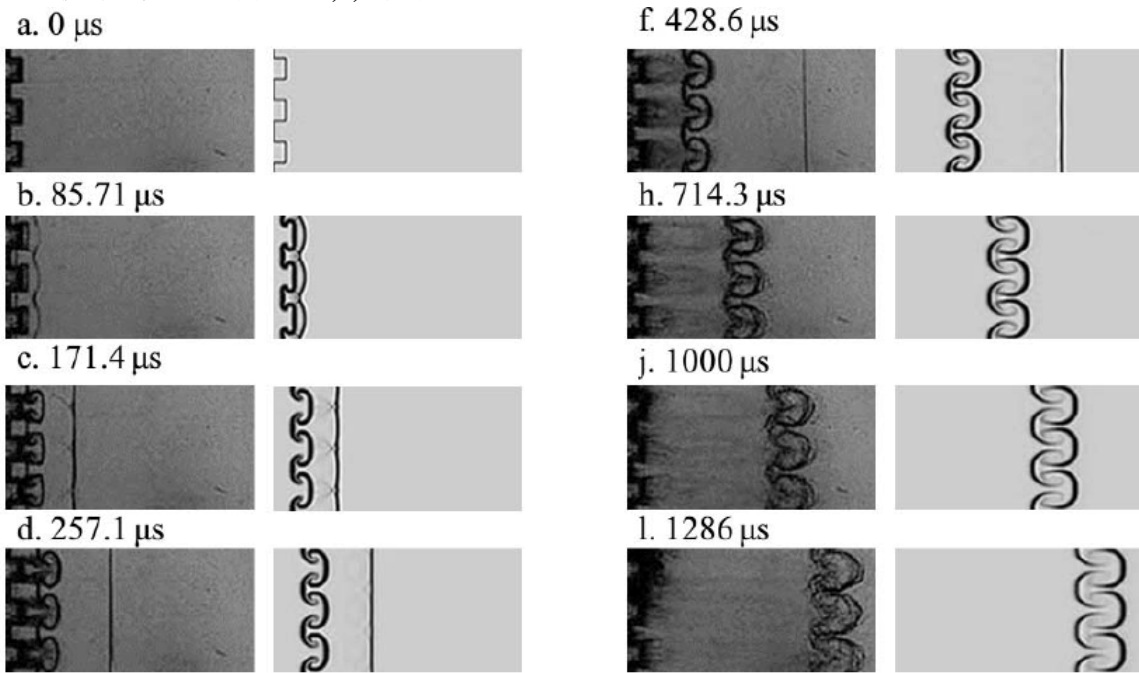


图 6 激波冲击 SF6 方波多模界面的高速纹影与数值模拟对比。

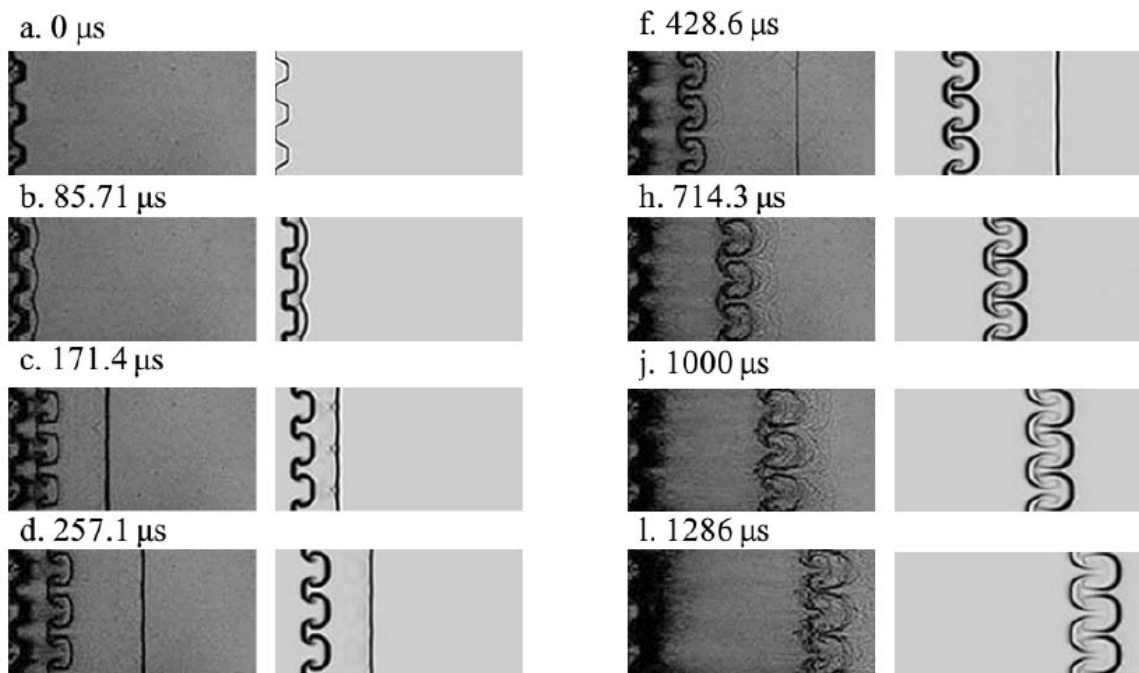


图 7 激波冲击 SF6 梯形波多模界面的高速纹影与数值模拟对比。

激波冲击单模正弦界面的高速纹影结果如图 9 所示。

4 结论

根据肥皂膜的特性，发展了两种技术，成功生成了多边形、多模及单模界面，并在激波管中研究了多类界面不稳定性的发展演变。通过高

速纹影观测到了这几类界面在平面激波冲击下的发展演化，并与数值结果进行了对比分析，证实本文气体界面生成技术的可行性。下一步

的工作将采用激光切片技术定量研究界面演化

规律。

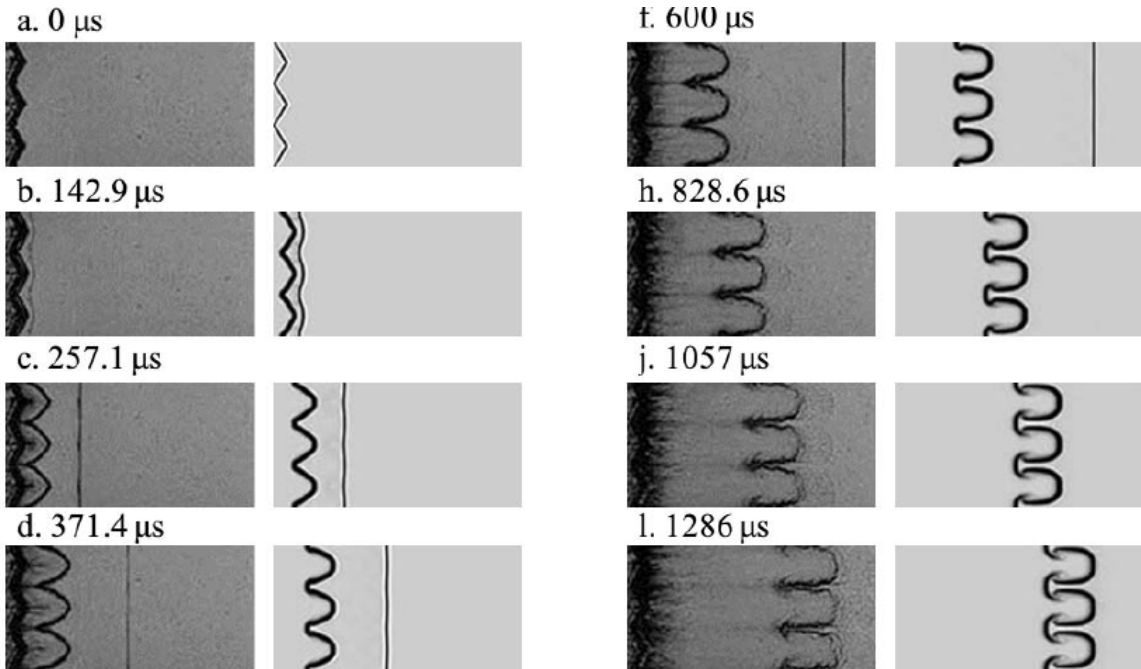


图 8 激波冲击 SF6 锯齿波多模界面的高速纹影与数值模拟对比。

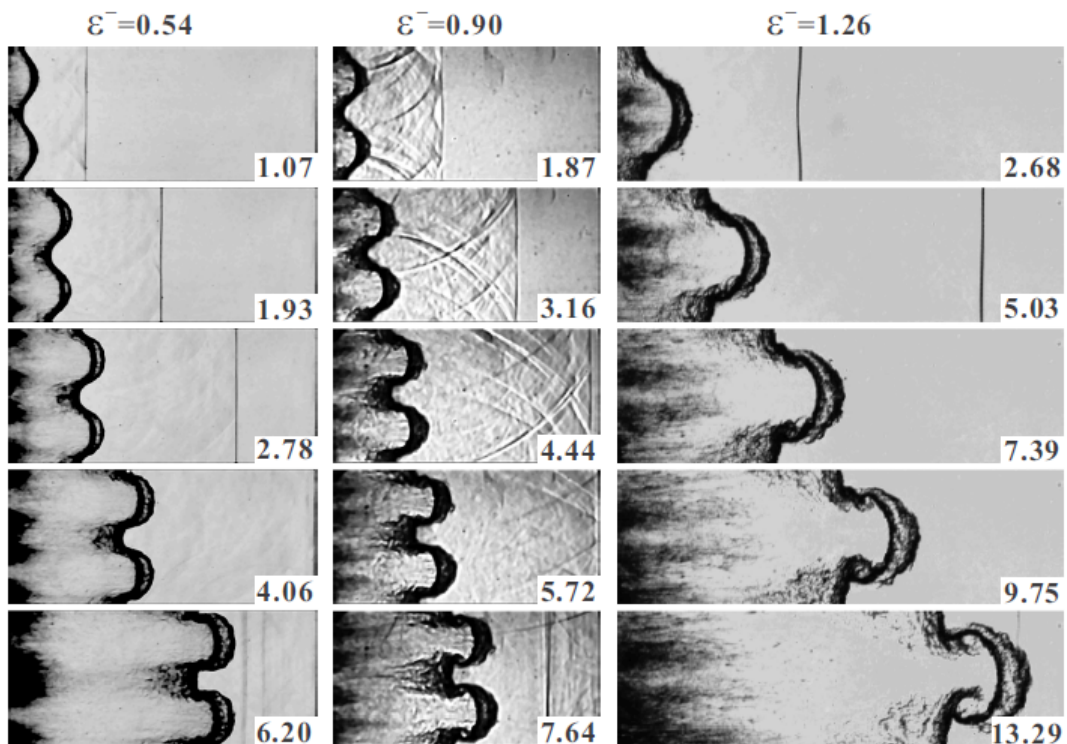


图 9 激波冲击后的单模正弦气体界面演变的纹影图

参考文献

1. Richtmyer RD. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. Commun. Pure Appl. Math., 1960, 13:297-319
2. Meshkov EE. Instability of the interface of two gases accelerated by a shock wave. Fluid Dyn., 1969, 4: 101-104
3. Zabusky NJ. Vortex paradigm for accelerated inhomogeneous flows: Visiometrics for the Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov environments. Annu. Rev. Fluid Mech., 1999, 31: 495-536

4. Brouillette, M. The Richtmyer-Meshkov instability. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2002, 34: 445–468
5. Dimotakis PE. Turbulent mixing. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2005, 37:329-356
6. Ranjan D, Oakley J and Bonazza R. Shock-bubble interactions. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2011, 43: 117–140
7. Jones MA and Jacobs JW. A membraneless experiment for the study of Richtmyer-Meshkov instability of a shock-accelerated gas interface. *Phys. Fluids*, 1997, 9(10): 3078-3085
8. Erez L, Sadot O, Oron D, et al. Study of the membrane effect on turbulent mixing measurements in shock tubes. *Shock Waves*, 2000, 10: 241-251
9. Isenberg C. *The science of soap films and soap bubbles*. New York: Dover publications, INC., 1992

Gas interface formation by soap film technique and its instability study

LUO Xisheng WANG Minghu WANG Xiansheng

(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Jinzhai Road 96, Hefei, 230026, China)

Abstract In this work, two new methods to create gas interface were proposed. First, the method of formation of any polygonal interface by using fine needles to restrict the soap film was described. Using this method, three different regular SF₆ interfaces (i.e. square, equilateral triangle and diamond) were successfully realized in shock tube experiments. A series of high resolution experimental schlieren images of RM instability on the three different interfaces were obtained. Numerical simulations were also performed to validate the proposed method of interface formation. Good agreement between the experimental results and simulations implies the proposed generation method of regular gas interface works well in experimental research of RM instability. By employing the same technique, three multi-mode interfaces were also created and studied in the shock tube. The second method to create a gaseous interface in the shape of minimum surface is proposed based on the soap film technique. The formed interface is free of supporting mesh and, therefore, its initial shape is well controlled. Because of the minimum surface feature, the formed interface is three-dimensional and has opposite principal curvatures in every point. Three sinusoidal bounded air/SF₆ interfaces with different initial amplitudes were realized in a horizontal shock tube for the RM instability study. The motion of the shocked interface was captured by a high-speed video camera in a schlieren system.

Key words Soap film technique, gas interface, Richtmyer-Meshkov instability