

文章编号: 1001-4888(2012)02-0160-05

## 激波管实验研究非均匀流场 R-M 不稳定性\*

刘金宏, 谭多望, 柏劲松, 黄文斌, 邹立勇, 张旭

(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重点实验室, 四川绵阳 621900)

**摘要:** 利用激波管装置及马赫数为 1.27 的弱入射激波实验研究了  $\text{SF}_6$  非均匀流场的 R-M 不稳定性。Air/ $\text{SF}_6$  初始正弦界面由厚度为  $0.5\mu\text{m}$  的薄膜相隔得到, 由阴影方法记录界面演化过程。实验结果表明: 由于不稳定性, 重流体( $\text{SF}_6$ )向轻流体(Air)演化成“尖钉”结构, 而轻流体演化为“气泡”结构; 由于界面切向速度差的 Kelvin-Helmholtz 不稳定性, “尖钉”头部翻转成蘑菇头形状; 由于流场密度分布不均, 低密度区流场扰动增长较快, 扰动振幅发展的实验结果与 PPM 数值计算的结果较吻合。

**关键词:** Richtmyer-Meshkov 不稳定性; 阴影摄影法; 非均匀流

**中图分类号:** O354.5      **文献标识码:** A

### 0 引言

激波作用下不同密度流体界面的失稳, 称为 Richtmyer-Meshkov(R-M)不稳定性。现实生活和自然界存在很多密度间断的流场, 如海平面与空气界面, 以及高能流物理高科技领域中如惯性约束聚变(ICF)中金属壳体与 DT 气体界面密度间断, 都存在界面不稳定性。界面不稳定性在某些领域是有利的, 如界面不稳定性能够加速燃料和气体间的混合, 提高燃料的利用率。而在有些领域是有害的、甚至是致命的, ICF 中界面不稳定性会阻碍壳体的压缩以及导致物质间的混合, 致使聚变材料纯度不够而点火失败。界面不稳定性问题具有较大的时空跨度, 大尺度如天体物理超新星爆发, 小尺度如 ICF 中 DT 气芯和金属壳体的混合。界面不稳定性问题在天体物理、ICF 高新技术以及非线性物理等领域具有重要的应用价值<sup>[1]</sup>。

相比爆轰加载、电磁和激光驱动而言, 激波管实验投资小、周期短, 更主要的是激波管具有可控的实验条件, 可以进行较为精确的机理性实验研究。作为基础性研究课题, 许多国家都已开展了广泛的激波管研究界面不稳定性实验。按照不同气体初始界面的生成方法, 激波管研究 R-M 不稳定性主要有两类实验: (1) 利用力学性能比较脆弱的薄膜相隔的方法生成不同密度气体的界面(有膜界面), 薄膜厚度小于  $1\mu\text{m}$  时对实验的影响可以忽略<sup>[1]</sup>, 如利用硝化纤维薄膜生成的各种正弦、尖角界面, 利用肥皂泡生成的气泡实验等; (2) 根据气体密度不同, 在重力下生成的自然界面(无膜界面), 如气柱、气帘实验。M. Vetter, B. Sturtevant 利用薄膜相隔的方法, 研究了 Air/ $\text{SF}_6$  平面界面 R-M 不稳定性, 以及反射激波作用混合区发展特征<sup>[2]</sup>。AWE(英国原子能中心)利用激光平面散射实验测试技术研究了不同初始结构下 Air/ $\text{SF}_6$ /Air 气体层界面的 R-M 不稳定性发展问题, 并开发了三维大涡模拟计算程序<sup>[3]</sup>。C. Marianim, M. Vandenboomgaerde, G. Jourdan 研究了 Air/ $\text{SF}_6$ 、Air/He 界面 R-M 不稳定性发展特征与不同波长和振幅的关系<sup>[4]</sup>。为研究压缩效应对界面不稳定性发展的影响, 俄罗斯实验物理研究院

\* 收稿日期: 2011-05-05; 修订日期: 2011-09-06

基金项目: 国防科技重点实验室基金(9140C6710011006), 国家自然科学基金(11072226)资助

通讯作者: 刘金宏(1980-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究领域: 流体动力学界面不稳定性实验。E-mail: ljhaep@21cn.com

(VNIIEF)的 E. Д. СЕНЬКОВСКИЙ 等开展了较高马赫数激波作用下 Air/SF<sub>6</sub> 界面 R-M 不稳定性发展特征研究:实验采用阴影测试方式,在测试方向具有积分效应,图像稍显粗糙,但从实验结果中可以清楚的看出界面 R-M 不稳定性在不同马赫激波作用下表现出迥异的发展特征<sup>[5]</sup>。为研究反射激波通过混合区以后,此时混合区宽度再增长的发展规律,以色列的 E. Leinov 进行了相关的实验和数值研究<sup>[6]</sup>。对于无膜气体界面 R-M 不稳定性实验研究工作最早由 Jacobs 开展(1993 年“气帘”实验)。Jacobs 课题组致力于无膜实验技术研究,先后开展了气帘、气柱实验,最近几年又创造性的发展了振荡激波管产生正弦单一模态二维、三维初始界面,利用 LIF 测试界面演化以及 PIV 测试速度场<sup>[7,8]</sup>。

本文利用厚度约 0.5 μm 的硝化纤维薄膜相隔得到初始界面形状,由阴影显示技术研究了平面激波冲击非均匀流场的界面演化特征,得到各个区域界面发展经历的线性增长,非线性发展过程,其中低密度区域界面发展较快。

## 1 实验方法

激波管可以提供毫秒量级时间间隔的均匀流动,在气动力学方面具有广泛的应用。同样,激波管在实验研究不同气体界面 R-M 不稳定性演化规律方面也得到广泛的应用。图 1 为实验研究不同气体界面 R-M 不稳定性演化规律的结构图:激波管由高压段(Drive),低压段(Driven)和实验段构成,内腔截面积为 200mm×100mm;1 为进气口,2 为出气口,3 为氧气浓度计,4 为初始界面模具,5 为压力传感器。不同气体初始界面的生成是此类实验研究的关键技术。本实验采用薄膜相隔的方法,将贴有薄膜的模具 4 安装在实验段,这样薄膜就将低压段与实验段隔开,SF<sub>6</sub> 气体经进气口流入实验段,实验段的空气经出气口 2 被排出,出气口处安装氧气浓度计 3,在激波管尾中部安装氧气浓度计 3(此处只用来检测氧气浓度,没有气流通过)。由于薄膜很脆弱,在进气口处由流量计控制气体流速约 2L/min,置换气体约 15min 后关闭进气口阀门,此时出气口氧气浓度为 4.85%(换算 SF<sub>6</sub> 浓度为 75.8%),尾部氧气浓度为 1.5%(SF<sub>6</sub> 浓度为 92.5%),这样实验段的不均匀流场就生成了。图 1(b)为初始界面模具实物图,图中 A 模具框架由 LY12 铝线切割得到,B 为穿在 A 上的碳丝(直径约为 0.1mm),C 为附在模具上的硝化纤维薄膜(厚度约为 0.5 μm),硝化纤维薄膜制备方法可参见文献[9]。激波过后,碳丝将薄膜切割成碎片,以减少薄膜对流场的影响。一层薄膜相当于不到 1mm 厚度空气的质量,低马赫激波作用下,薄膜不会发生热分解而产生其它气体,文献[1]认为薄膜对界面扰动的发展是没有影响的。

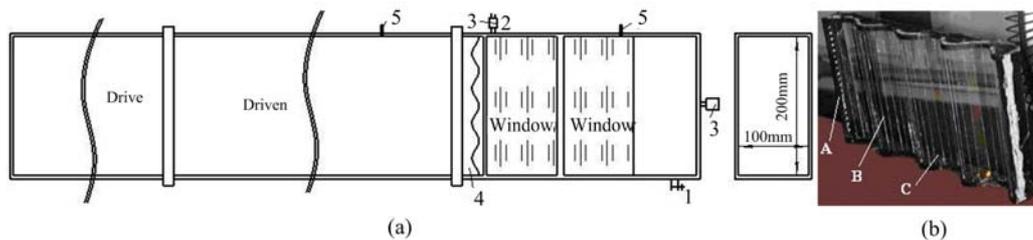


图 1 实验结构示意图

Fig. 1 Method for experimental structure

如图 2 所示是激波管中激波作用 Air/SF<sub>6</sub> 界面的一维 X-T 示意图:O 点是高压段与低压段的初始间断面,由膜片相隔得到,实验时通过物理的方法将其瞬间破碎,向高压段传播稀疏波 OA,高压段气体与低压段气体间断面 OM 推动低压气体向后运动,往低压段传播激波 OB;激波 OB 运动到 Air 和 SF<sub>6</sub> 的接触面 B 时发生反射,反射波对应 BC,透射波对应 BD。激波运动到 Air/SF<sub>6</sub> 界面时为实验零时(T<sub>0</sub>),尾部固壁反射激波到达 Air/SF<sub>6</sub> 界面时为实验有效时间(T<sub>1</sub>)。图 3 为实验测得压力信号,P<sub>1</sub> 对应图 2 中 2 区域(OB 波后压力),理论上 BD 和 BC 波后压力(图 2 中 5 区域)相等,其压力对应图 3 中的 P。

气体的光学折射率是其密度的函数,通过流场的每一条光线所受到的光学扰动都显示出了流场中气体密度分布的情况。阴影、纹影就是根据这一原理来测试不同密度气体流场演化的。因此,纹影、阴

影测试方法在不同密度气体间的界面不稳定性实验研究方面得到了广泛的应用。本实验采用阴影显示的方法,结合数字高速摄影技术对 Air/SF<sub>6</sub> 界面演化过程进行测试。具体方法可参见文献[9]。

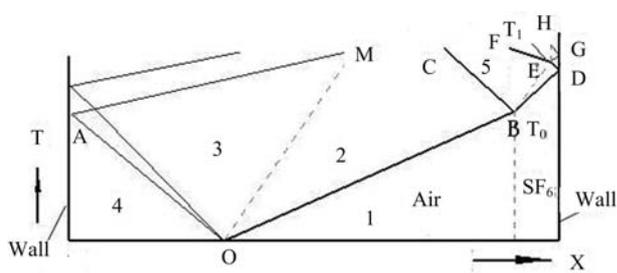


图2 X-T图

Fig. 2 The sketch map of X-T

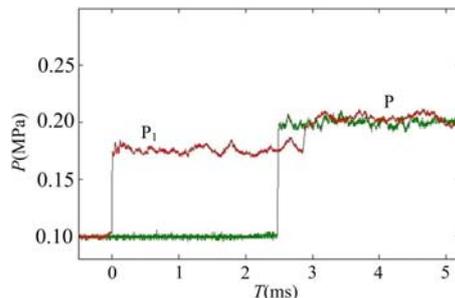


图3 实验压力曲线

Fig. 3 The curve of pressure

## 2 实验结果和分析

图 4(a)为 Air/SF<sub>6</sub> 初始界面示意图,激波 SW 到达界面时为实验零时刻,界面方程为:

$$y = 5 \sin(2\pi x/50), \quad 0 \leq x \leq 112.5$$

$$y = 7.5 \sin(2\pi x/50), \quad -87.5 \leq x \leq 0$$

空间尺度单位为毫米。 $h_a, h_b, h_c$  分别为图 4(a)三种不同初始扰动幅度下的扰动幅度,其中  $h_a(0) = 10\text{mm}$ ,  $h_b(0) = 12.5\text{mm}$ ,  $h_c(0) = 15\text{mm}$ 。激波运动方向自左向右,入射激波马赫数为 1.27。利用图 1 结构得到的非均匀流场中,只对流场中部和顶部进行了 SF<sub>6</sub> 浓度测试。文献[11]中不同气体扩散密度场分布函数为高斯函数,结合实验数据认为非均匀流场密度为:

$$\rho(y) = \rho_0 \exp(-(y - y_c)^2 / \delta^2) \tag{1}$$

其中  $y_c = 0$ ,  $\delta = 37.29\text{mm}$ 。

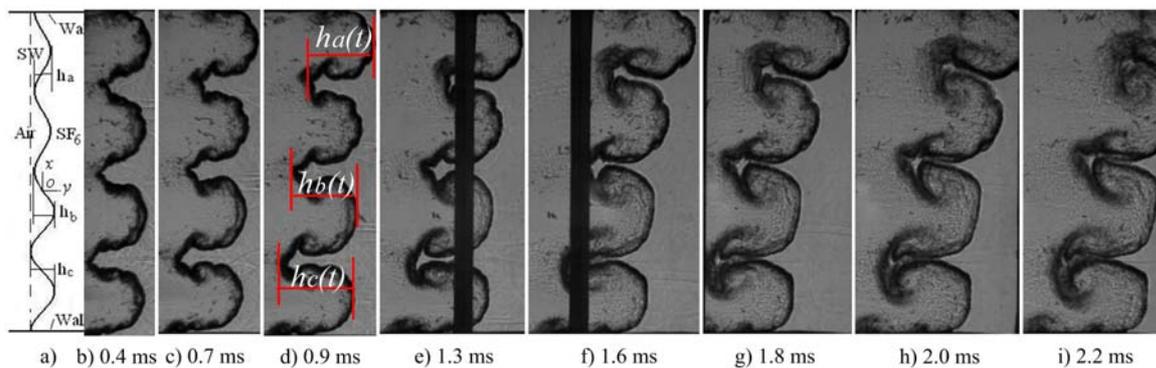


图4 Air/SF<sub>6</sub> 界面发展图

Fig. 4 Results of evolution of Air/SF<sub>6</sub> interface

图 4(b)~(i)为不同时刻 Air/SF<sub>6</sub> 界面演化图。界面发展分为三个阶段:(1)扰动线性增长,重流体(SF<sub>6</sub>)发展成“尖钉”,轻流体(Air)发展成“气泡”(图 4(b));二、由于界面切向速度差,使得“尖钉”头部形成翻转的蘑菇头形状(图 4(c)~(g));三、蘑菇的伞或杆变细边长(图 4(h)、(i)),进而破碎,形成复杂的界面形状(由于实验视场局限,界面发展后期破碎后到混合过程没能记录)。柏劲松<sup>[10]</sup>采用 PPM 计算格式的大涡模拟模型,对此实验结果进行了数值模拟,实验与数值计算结果的对比如图 5。具体的数值模拟方法可参见文献[10]。

为对比研究不同初始扰动下,非均匀流场的振幅演化特性,对扰动幅度进行无量纲量定义: $\eta_a(t) = h_a(t)/h_a(0)$ ,  $\eta_b(t) = h_b(t)/h_b(0)$ ,  $\eta_c(t) = h_c(t)/h_c(0)$ 。 $h_a(t)$ ,  $h_b(t)$ ,  $h_c(t)$  分别为  $t$  时刻图 4 中不同位置的扰动幅度,其中  $h_a(0) = 10\text{mm}$ ,  $h_b(0) = 12.5\text{mm}$ ,  $h_c(0) = 15\text{mm}$ 。图 6 为无量纲振幅发展对比图:

数值和实验结果都表明相同强度入射激波冲击下, 相对初始振幅的振幅扰动发展速度随  $SF_6$  浓度(流场密度)降低而升高。由于上部气体密度低即声速较大, 所以上部界面运动速度较快, 激波在非均匀流场透射后变得弯曲(图 5 中 SW), 整个界面具有整体向下翻转的特征。这主要是由于流场密度上低下高(相应流场的声速是上部高而下部低), 使得入射激波在界面具有不同的透射强度, 造成界面速度发展不均。

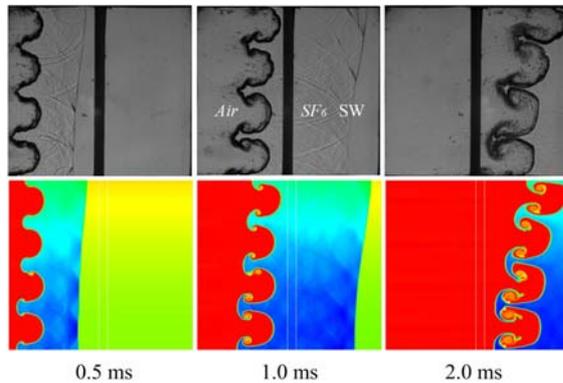


图 5 实验(上)、数值(下)结果对比图

Fig. 5 Results of experimental (top) and simulation (down)

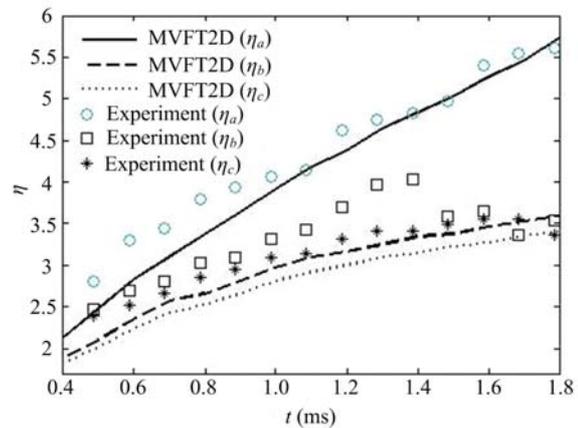


图 6 无量纲振幅发展对比图

Fig. 6 Evolution of dimensionless amplitude

### 3 结论

利用厚度约  $0.5\mu\text{m}$  的硝化纤维薄膜相隔生成正弦结构的 Air/ $SF_6$  初始界面, 由阴影显示技术得到了较为清晰的界面演化图像。由于 R-M 不稳定性重流体( $SF_6$ )向轻流体(Air)演化成“尖钉”结构, 而轻流体演化为“气泡”结构, 界面存在速度差而产生 Kelvin-Helmholtz 不稳定性, “尖钉”头部翻转成蘑菇头形状; 由于流场密度分布不均, 使得入射激波在界面具有不同的透射强度, 使得低密度区流场扰动增长较快, 整体界面具有由低密度区向高密度区发展的趋势。界面在相同强度的入射激波冲击下, 界面扰动发展速度同流场密度相关, 低密度区增长较快。

#### 参考文献:

- [1] Мешков Е. Е. Исследования гидродинамических неустойчивостей в лабораторных экспериментах [М]. Саров: ФГУП "РФЯЦ—ВНИИЭФ, 2006.
- [2] Vetter M, Sturtevant B. Experiments on the Richtmyer-Meshkov instability of an air/ $SF_6$  interface [J]. Shock Waves, 1995, 4(5): 247—252.
- [3] Holder D A, Smith A V, Youngs D L. Shock-tube experiments on Richtmyer-Meshkov instability growth using an enlarged double-bump perturbation [J]. Laser and Particle Beams, 2003, 21(3): 411—418.
- [4] Marianim C, Vandenboomgaerde M, Jourdan G. Investigation of the Richtmyer-Meshkov instability with stereolithographed interfaces [J]. Physical review letters, 2008, 100:(254503)1—4.
- [5] Сеньковский Е Д, Невмержицкий Н В, Разина Н. Исследование Развития Турбулентного Перемешивания И Возмущений В Газох С Повышенной Сжимаемостью При Числах Маха Ударной Волны От 2 До 9 [С]. IX Заббахинские научные чтения, 2007.
- [6] Leinov E, Formoza A, Sadot O. Experimental investigation of hydrodynamic instability induced by multiple accelerations of a contact surface between two fluids [C]. 10th IWPCTM (France) 2006.
- [7] Jacobs J W, Krivets V. Experiments on the late-time development of single-mode Richtmyer-Meshkov instability [J]. Physics of Fluids, 2005, 17(3): 034105-1-10.
- [8] Chapman P R, Jacobs J W. Experiments on the three-dimensional incompressible Richtmyer-Meshkov instability [J]. Physics of Fluids, 2006, 18(7): 074101-1-12.

- [9] 刘金宏, 黄文斌, 谭多望 等. 激波冲击下 Air/SF<sub>6</sub> 斜界面不稳定性实验研究[J]. 实验流体力学, 2010, 24(6): 27—31 (Liu Jin-hong, Huang Wen-bin, Tan Duo-wang, et al. Experimental study of instability of shock accelerated Air/SF<sub>6</sub> inclined interfaces[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2010, 24(6):27—31(in Chinese))
- [10] Jing-song Bai, Jinhong Liu, Tao Wang. Investigation of the Richtmyer-Meshkov instability with double perturbation interface in nonuniform flows[J]. Physical Review E, 2010, 81(5):0563021-1-5.
- [11] Sandeep G, Zhang S, Zabusky N J. Shock interaction with a heavy gas cylinder: Emergence of vortex bilayers and vortex-accelerated baroclinic circulation generation[J]. Laser and Particle Beams, 2003, 21(3):443—448.

## Experimental Study of Richtmyer-Meshkov Instability in Nonuniform Flow by Shock Tube

LIU Jin-hong, TAN Duo-wang, BAI Jing-song, HUANG Wen-bin, ZOU Li-yong, ZHANG Xu

(Science and Technology on Shock Wave and Detonation Physics Laboratory, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Richtmyer-Meshkov instability in SF<sub>6</sub> nonuniform flow was experimentally studied by producing a weak incident shock wave with Mach number 1.27 in a shock tube. Initial sinusoidal interface between Air/SF<sub>6</sub> was formed by a polymeric membrane with thickness of 0.5 μm and the interface evolution was measured by using shadowgraph method. Experimental result show that the instability is characterized by "spike" of heavy fluid falling into lighter fluid and the bubbles of lighter fluid rising into heavy fluid. At the edge of spike, rolling mushroom occurs due to Kelvin-Helmholtz instability produced by the difference of interface tangential velocities. Evolution of flow disturbance grows faster in the low density zone due to the initial density nonuniformity in flow field. Experimental results of disturbance amplitude growth are in good agreement with PPM simulation results.

**Keywords:** Richtmyer-Meshkov instability; shock tube; shadowgraph method; nonuniform flow