文章编号：1000-5773(2011)02-0177-06

PIV 技术在气体界面不稳定性实验研究中的应用*

高　宁，张光升，林　俊

（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国防科技重点实验室，四川绵阳　621900）

摘要：采用粒子图像测速(Particle Image Velocimetry，PIV)技术，以乙二醇烟雾作为示踪粒子，实验测量了平面激波作用下 SF_6 气柱-空气界面 Richtmyer-Meshkov 不稳定性演化图像和二维速度场。测量结果揭示了不稳定性流场的典型特征和细微结构，与高速摄影和数值模拟结果符合，说明建立的 PIV 技术适合用于诊断气体界面演化过程，为气体界面不稳定性实验研究提供了一种先进、精细的诊断技术。

关键词：粒子图像测速技术；界面不稳定性；气柱实验；激波管

中图分类号：O521.3；O351.2　　**文献标识码**：A

1　引　言

流体动力学界面不稳定性是指两种流体界面上的初始扰动在一定条件下将发展，形成不稳定的界面，直至湍流混合。界面不稳定性一般可分为 3 类：第 1 类是不同密度的流体界面在重力或加速运动引起的惯性力作用下产生的，称为 Rayleigh-Taylor(RT)不稳定性；第 2 类是不同密度的流体界面在冲击波作用下产生的，称为 Richtmyer-Meshkov(RM)不稳定性；第 3 类是由流体界面间存在的切向速度差产生的，称为 Kelvin-Helmholtz(KH)不稳定性。这些界面不稳定性无论在天体物理、地球物理等自然科学研究领域，还是在激光约束聚变、高速碰撞、航空航天等高技术研究领域都有重要应用。

本研究关注的是 RM 不稳定性问题。目前，研究 RM 不稳定性的实验方法主要有 3 种。一是利用炸药爆轰驱动高应变率金属材料，利用闪光 X 光照相技术进行研究。这种方法简单，主要问题在于测试困难，实验数据的精度不高，因此多用于定性研究。二是利用激波管或气相爆轰加载技术，结合先进的高速摄影、纹影、测速、测浓度技术，精确测量透明低密度介质界面不稳定性从产生、发展、增长到湍流混合的全过程，如激波管实验、果冻内爆实验等。这种方法易于测量，主要问题是如何形成清晰的界面以及如何拓展应用到武器研究领域。三是电磁或激光驱动的固体套筒内爆实验。这种方法可以实现很高的能量密度，主要问题是测试困难、实验样品尺寸小，例如美国利用 OMEGA 激光器进行的微型柱、球固体套筒内爆实验，其外壳初始厚度只有 60～70 μm，湍流混合区的最大宽度仅 100 μm[1]。

相比而言，激波管实验投资小，周期短，容易实现，可以获得高精度的实验数据，是界面不稳定性机理研究的首选方法。目前，国外已开展了广泛深入的研究，如美国 Lawrence Livermore 国家实验室(LLNL)和俄罗斯技术物理研究院合作开展的多功能激波管气-气界面不稳定性实验[2]、美国 Los

* **收稿日期**：2010-12-09；**修回日期**：2010-12-16

基金项目：国防科技工业技术基础质量与可靠性科研项目(Z112009B004)；冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室基金(9140C6710011006)

作者简介：高　宁(1965－)，女，主要从事光学测试研究. E-mail：ningn_gao@163.com

Alamos国家实验室(LANL)进行的无膜气柱实验[3]、英国原子武器研究院开展的双膜实验和扇形汇聚实验以及日本开展的柱形汇聚实验。诊断技术从早期的纹影、X 光、激光多普勒等发展到激光纹影/阴影测量流动过程、粒子图像测速(Particle Image Velocimetry,PIV)技术测量流场速度分布、平面激光诱发荧光(Planar Laser-Induced Fluorescence,PLIF)技术测量流场浓度分布。其中 PIV 和 PLIF 技术以其高分辨"切片"和定量化等优势,可以测到不稳定性线性阶段、非线性增长阶段的高精度实验数据,甚至可以得到湍流混合阶段的定量数据,因此被广泛应用于 RAGE、CUERVO、RAPTOR、CHARD 等界面不稳定性计算程序的校验[4]。

本研究以 RM 界面不稳定性典型实验——气柱实验为例,介绍 PIV 技术在气体界面不稳定性实验研究中的应用,为流体动力学界面不稳定性实验研究提供基础。

2 PIV 技术原理

PIV 技术是一种瞬态、多点、非接触式的流体动力学测速方法,其最大特点是突破了单点测速技术的局限性,能在同一时刻记录下大量空间点上的速度分布信息,提供丰富的流场空间结构以及流动特性,具有较高的测量精度。PIV 技术除了向流场散布示踪粒子外,所有测量装置均不进入流场,对流场的影响非常小,因此成为人们广泛接受的、热门的流体动力学测量技术,在湍流结构研究、非定常瞬态流场测量、复杂或特殊几何结构的流场测量、涡量场测量等方面发挥了重要作用。

PIV 测量系统由脉冲激光器、高速相机、片光源装置、控制计算机、示踪粒子以及数据处理软件组成,其基本测量原理如图 1 所示。在流场中散布示踪粒子,将脉冲激光片光源入射到被测流场区域中,通过连续两次曝光(分别对应 t 时刻和 $t+\Delta t$ 时刻),粒子图像被记录在 PIV 相机上。采用数字图像法,分片处理相机记录的图像,通过相关算法,求出各查询区示踪粒子经过 Δt 时间运动的位移量,进而获得流场速度分布。需要注意的是,示踪粒子在 PIV 测试中非常重要,因为只有示踪粒子有足够高的流动跟随性,才能够真实地反映流场的运动状态。高质量示踪粒子的要求为:密度与实验流体相近;大小分布均匀且为圆形;尺寸小,但有足够高的光散射效率[5]。

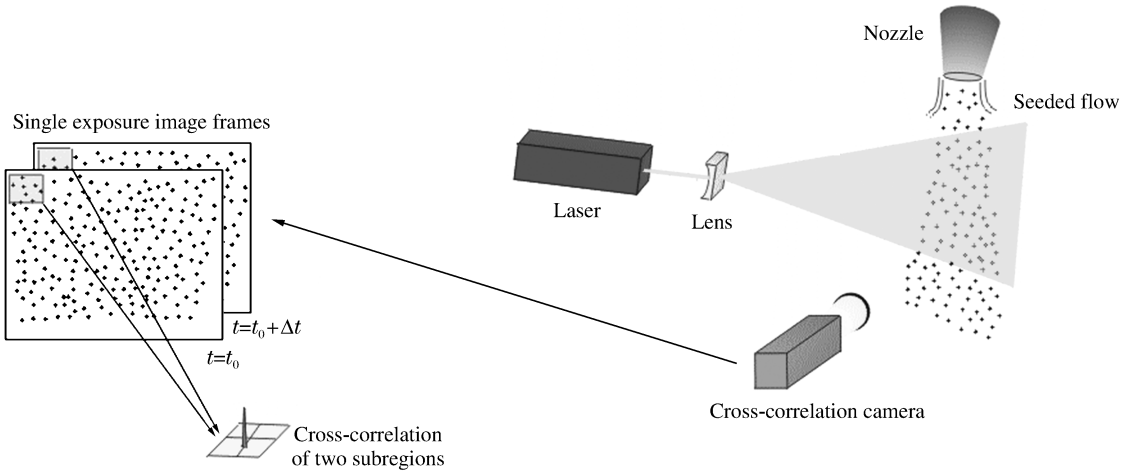


图 1 PIV 测试系统

Fig. 1 PIV diagnostic system

3 实验和测试方法

3.1 实验装置

气体界面不稳定性实验主要在激波管上进行。图 2 为激波管示意图,其中高压段长 1.03 m,低压段和实验段共长 3.67 m,实验段内截面为方形,尺寸为 50 mm×50 mm。实验段采用透明结构,以便从

4 个方向上观测实验过程,同时增加了烟雾发生器、气体箱和进气/吸气系统。尾段末端盖采用封闭法兰结构,法兰中央位置安装截面为 50 mm×50 mm 的 K9 玻璃,便于流场照明。本实验中,冲击作用气体界面的入射激波马赫数 Ma 为 1.2。

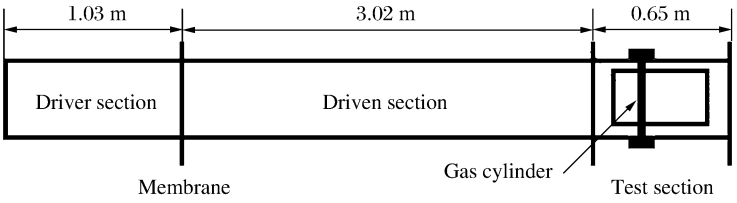


图 2 激波管示意图

Fig. 2 Schematic of shock tube

3.2 气柱实验

气柱实验是利用圆形气体喷嘴向下喷射密度远大于空气的气体(如 SF_6),与空气形成自然的弧形界面,在平面激波的诱导下产生 RM 界面不稳定性,如图 3 所示。气柱实验是研究 RM 界面不稳定性的典型实验,因为它不仅可以模拟研究 RM 界面不稳定性从产生、发展、增长到湍流混合的全过程,获得物理规律和机理性认识,而且可以研究涡量的产生和增长规律,有助于认识湍流流场的特性,建立湍流模型。

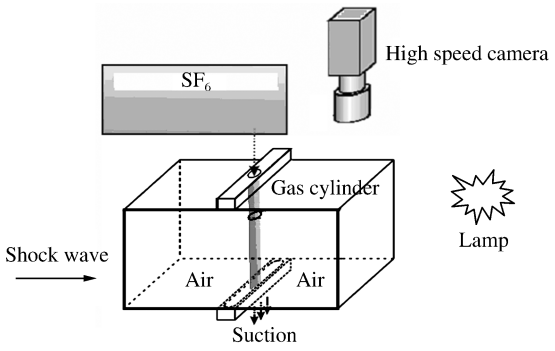


图 3 SF_6 气柱界面示意图

Fig. 3 Schematic of SF_6 gas cylinder interface

本研究采用高速摄影方法,观察了在 $Ma=1.2$ 的平面激波作用下,$\varnothing$6 mm SF_6 气柱-空气界面 RM 不稳定性演化过程,实验结果如图 4 所示。依据涡量动力学可知,涡量的产生是由于密度梯度方向与压力梯度方向不一致造成的。因为 SF_6 气柱的密度大于周围空气密度,所以密度梯度方向是沿着气柱径向指向气柱中心。在激波自左向右扫过气柱的过程中,由于激波与气柱的相互作用,在气柱表面逐渐产生了涡,并且气柱上半表面和下半表面的涡方向相反,涡量最大值出现在压力梯度与密度梯度垂直的地方,即气柱上下边缘处[6]。随着涡的产生和增长,SF_6 气柱逐渐演化为两个涡,形成对涡结构,气柱的高度和宽度逐渐增加,这与 Zoldi 的实验结果[3]一致。

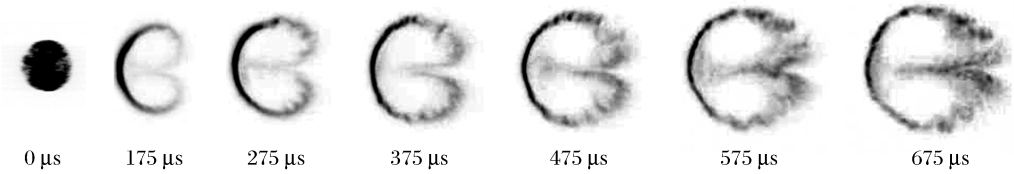


图 4 SF_6 气柱界面演化过程图像

Fig. 4 Evolution images of a shocked SF_6 gas cylinder

3.3 PIV 测试方法

在高速摄影的基础上,进行了 PIV 测量,实验布局如图 5 所示。示踪粒子采用乙二醇烟雾,由烟雾发生器产生;PIV 相机采用 Nikon 相机,最小跨帧时间为 200~400 ns;片光源采用 New Wave 公司的 Nd:YAG 双脉冲激光器,波长为 532 nm,单脉冲能量约为 120 mJ,片光源厚度约为 1 mm。通过实验,

可以获得片光源所在平面上两次曝光之间的二维速度场。

4 实验结果与分析

实验选取 $t=300\ \mu s$ 和 $t=400\ \mu s$ 两个时刻进行 PIV 测试。$t=300\ \mu s$ 时的气柱演化 PIV 图像如图 6所示。图 6 中还给出了 Zoldi 的测试结果[3]。可以看到,两者的流场特征相同,并且本实验获得的演化图像比 Zoldi 的结果更清晰。

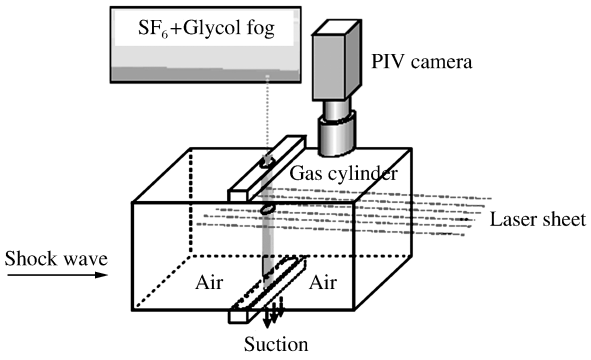
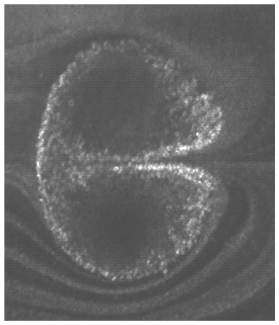


图 5 SF_6 气柱界面的 PIV 测试示意图

Fig. 5 Schematic of PIV measurement for SF_6 gas cylinder interface

设置 PIV 相机跨帧时间为 5 μs。图 7 为 $t=400\ \mu s$ 时气柱演化的两幅 PIV 图像。采用 PIV 系统的 Insight 后处理软件,对两幅 PIV 图像中的方框标示区域(见图 7 下半部分)进行互相关处理,可以得到二维速度场,将二维速度场中的流向速度减去平均速度,可得到相对坐标系下(即跟随气柱运动)的二维速度矢量图,如图 8 所示。由图 8 可知,下半流场呈逆时针方向旋转。



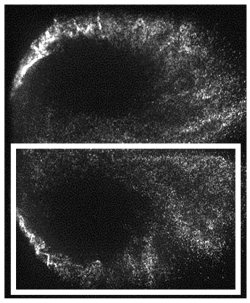
(a) Photograph of this study ($t=300\ \mu s$)



(b) Photograph of LANL ($t=300\ \mu s$)

图 6 SF_6 气柱的 PIV 测试图像对比

Fig. 6 Comparison of PIV images of SF_6 gas cylinder



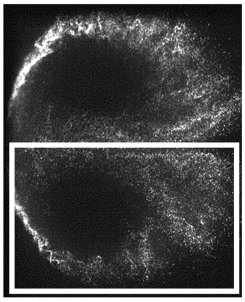


图 7 SF_6 气柱的 PIV 测试图像对($t=400\ \mu s$,$\Delta t=5\ \mu s$)

Fig. 7 A pair of PIV images of SF_6 gas cylinder ($t=400\ \mu s$,$\Delta t=5\ \mu s$)

图 9 为速度矢量和流向速度 u 等值线图。观察图 9 可知,流向速度最大值出现在流场下沿,最小值出现在流场中间(流场上下对称,图 9 只给出了下半部分)。图 10 为速度矢量和展向速度 v 的等值线图。其中,展向速度最大值出现在不稳定性流场后沿,最小值出现在流场前沿。比较图 9 和图 10 可以看出,流向速度值的分布范围比展向速度值大很多,这主要是因为激波给流场附加了很大的流向速度,

流向是主要运动方向,而展向速度则只是由于涡的旋转运动引起的。图 11 为速度矢量和涡量等值线图。可以看出,涡量最大值出现在旋转运动中心,见图 11 中方框标示区域,该位置对应的速度值最小,几乎为零。

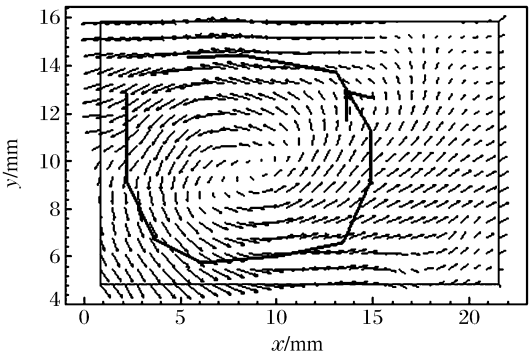


图 8　流场速度矢量图(t=400 μs)

Fig. 8　Velocity vectors of the flow field (t=400 μs)

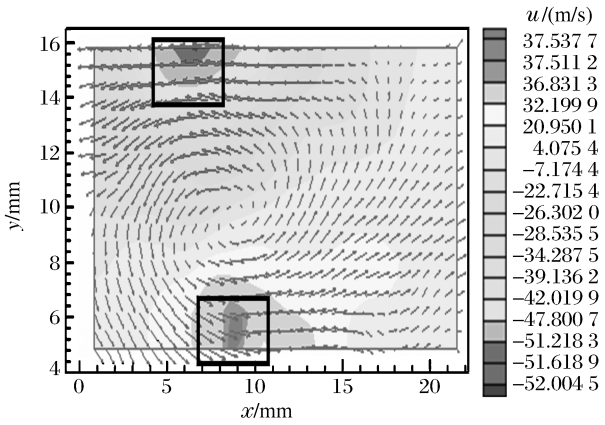


图 9　速度矢量和流向速度 u 等值线图

Fig. 9　Velocity vectors and streamwise velocity contours

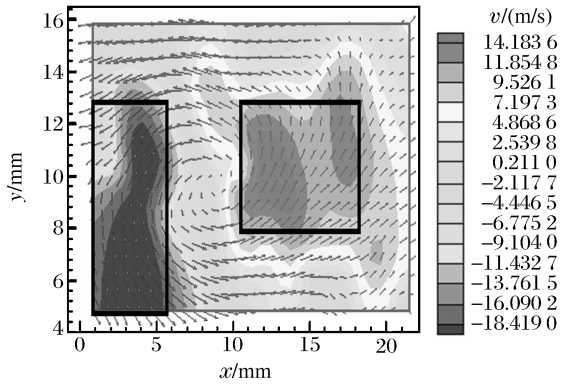


图 10　速度矢量和展向速度 v 等值线图

Fig. 10　Velocity vectors and spanwise velocity contours

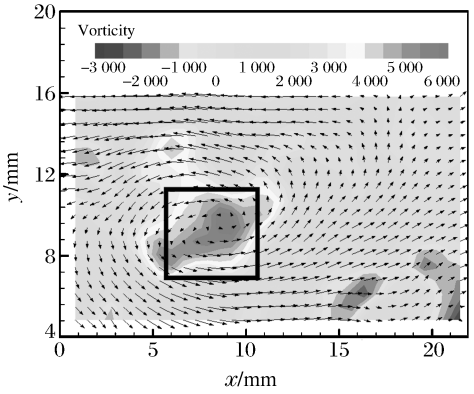


图 11　速度矢量和涡量等值线图

Fig. 11　Velocity vectors and vorticity contours

图 12 为实验和数值模拟[7]得到的流向速度直方图比较,其中横坐标表示流向速度值,纵坐标表示位于该范围的速度值个数占全部速度个数的百分比。由图 12 可知,计算结果与实验结果符合较好。

5　结　论

在气体界面不稳定性激波管实验中,应用 PIV 测试技术,测量了 Ma=1.2 的平面激波作用下 SF_6 气柱-空气界面 RM 不稳定性演化速度场,实验结果与美国 LANL 的实验结果基本一致。利用 Insight 后处理软件,得到了 t=400 μs 的二维速度场、流向速度等值线、展向速度等值线、涡量等值线、速度直方图,实验结果与已发表的理论和实验结果符合,说

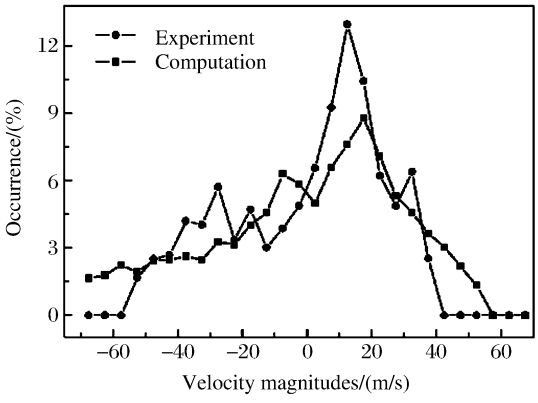


图 12　实验速度和计算速度直方图

Fig. 12　Computational and experimental histogram of the velocity magnitudes

明建立的 PIV 技术是可行的。利用 PIV 测试技术,能够观测到气体界面不稳定性流场的精细结构,为进一步开展气体界面不稳定性精密物理实验研究奠定了良好的基础。

References:

[1] Bakhrakh S M, Drennov O B, Kovalev N P, et al. Hydrodynamic Instability in Strong Media, UCRL-CR-126710 [R]. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 1997.

[2] Kucherenko Y A, Shestachenko O E, Balabin S I, et al. RFNC-VNIITF Multifunctional Shock Tube for Investigating the Evolution of Instabilities in Nonstationary Gas Dynamic Flows [J]. Laser Part Beams, 2003, 21(3): 381-384.

[3] Zoldi C A. A Numerical and Experimental Study of a Shock-Accelerated Heavy Gas Cylinder [D]. Stony Brook: State University of New York, 2002.

[4] Fishbine B. Code Validation Experiments—A Key to Predictive Science [J/OL]. Los Alamos Research Quarterly, 2002: 6-14.

[5] Fan J C. Modern Flow Visualization [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. (in Chinese)
范洁川. 近代流动显示技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

[6] Zou L Y, Liu J H, Tan D W, et al. Experimental Study on the Membraneless Heavy Gas Cylinder and Gas Curtain Interfaces Impacted by a Weak Shock Wave [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(4): 241-247. (in Chinese)
邹立勇, 刘金宏, 谭多望, 等. 弱激波冲击无膜重气柱和气帘界面的实验研究 [J]. 高压物理学报, 2010, 24(4): 241-247.

[7] Li P, Bai J S, Wang T, et al. Large Eddy Simulation of a Shocked Gas Cylinder Instability Induced Turbulence [J]. Science in China Series G, 2009, 39(9): 1241-1247. (in Chinese)
李 平, 柏劲松, 王 涛, 等. 激波作用下气柱不稳定性发展诱发湍流大涡数值模拟 [J]. 中国科学 G 辑, 2009, 39(9): 1241-1247.

An Application of PIV Technique in Gas Interfacial Instability Experiment

GAO Ning, ZHANG Guang-Sheng, LIN Jun

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: An experimental investigation on gas interfacial instability was carried out with particle image velocimetry (PIV) technique. The evolution images and two dimensional velocity field of a shock-accelerated heavy gas cylinder in air were experimentally measured utilizing glycol fog droplets as tracking particle. The results exhibited the typical characteristics and fine structure of instability flow field, which were consistent with the numerical and experimental results published previously. Therefore, the PIV technique is feasible to measure the gaseous interface evolution process, and also is a advanced and accurate diagnostic technology for gaseous interfacial instability experiment.

Key words: particle image velocimetry technique; interfacial instability; gas cylinder experiment; shock tube