文章编号：1000-5773(2009)06-0460-07

平面弱激波加载下球形气泡演化的实验研究*

郭文灿，刘仓理，谭多望，刘金宏，邹立勇，张光升

（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：利用高速摄影机直接观测了激波加载下球形气泡的演化过程。采用白色的烟雾颗粒对气泡内透明的测试气体进行染色，直接观察到了气泡界面。通过对平面弱激波加载下轻气体气泡和重气体气泡进行研究，成功验证了轻气体气泡和重气体气泡演化过程中出现的典型界面结构，获得了弱激波加载轻气体气泡中背风涡环的环状几何结构。运用相关方法分析了轻气体气泡实验初期的流场分布，得到的结果与理论分析结果吻合得很好，对于此类实验的数据处理具有一定的启发意义。同时，实验中使用的烟雾颗粒法为今后在球形气泡实验中引入更为精确的平面激光诱导荧光技术（PLIF）、激光粒子图像测速技术（PIV）等实验测试系统提供了布撒示踪粒子的范例。

关键词：激波；Richtmyer-Meshkov 不稳定性；气泡；示踪；相关方法
中图分类号：O354.5 **文献标识码**：A

1 引 言

两种不同密度分层流体的交界面受到激波加载而引起的不稳定运动，称为 Richtmyer-Meshkov（RM）不稳定性，在自然界和工程中经常遇到。由于它在基础研究和工程实践上具有重要意义，因此自发现至今一直都是激波动力学中非常重要的研究方向。掌握激波与交界面的相互作用过程，对于超声速冲压发动机中的混合和燃烧、激光加载惯性约束热核聚变等研究起着十分重要的引导作用[1-2]。

平面弱激波（激波马赫数小于 1.4）加载单个球形气泡是大初始扰动界面下 RM 不稳定性研究的典型例子。Rudinger 和 Somers[3] 最早于 1960 年使用纹影仪对平面激波加载非球形气泡进行了理论和实验研究，结果显示轻气体（密度小于气泡界面外的环境气体密度）气泡比环境气体运动得快，重气体（密度大于气泡界面外的环境气体密度）气泡比环境气体运动得慢。随后，Hass 等人[4] 针对激波加载球形气泡和柱形气泡开展了大量的实验研究，并首次指出激波加载球形轻气体气泡和重气体气泡分别会在不同阶段出现双涡环结构和尖峰结构，但他们的实验每次只能得到单幅图像，无法展现演化的全过程。20 世纪 90 年代以来，Layes 等人[5-6] 运用纹影仪并结合高速摄影等诊断技术，研究了激波加载重气体气泡、轻气体气泡和密度接近环境气体的球形气泡，得到了不同密度气泡演化的全程图像；同时，他们还对气泡演化中涉及到的一些特征尺寸进行了定量分析和归纳，并初步认定不同类型气泡的横向尺寸测量值在激波的初始压缩作用后随时间是线性变化的。近年来，国内在 RM 不稳定性研究方面也开展了大

* **收稿日期**：2009-02-12；**修回日期**：2009-03-17
基金项目：国家自然科学基金（10772166）；冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室基金（9140C6701010702）；中国工程物理研究院科学技术基金（2008B0202011）；国防科技工业技术基础质量与可靠性科研项目（Z112009B004）
作者简介：郭文灿（1984－），男，硕士研究生，主要从事爆炸力学与流体力学研究. E-mail：guowencan@gmail.com

量工作,主要集中在数值模拟方面[7-8],而实验方面则仅有一些起步性工作[9],从已公开发表的文章情况来看,与国外的研究水平尚有一定差距。

在已有的激波加载球形气泡实验中[4-5],都是采用测试气体吹制肥皂泡方法得到球形气泡界面,吹制气泡时使用的测试气体都是无色较纯净的气体(如氦气等),借助纹影技术观测气泡界面在激波加载下的演化过程。但是,纹影技术是一种依靠流场密度分布的梯度差来诊断的实验技术,必须结合理论分析来辨别气泡界面的演化形态,对诸如涡环等几何形态不能进行直观论断。本研究采用烟雾颗粒对球形气泡内的测试气体进行染色,借助高速摄影机分别对轻气体气泡和重气体气泡的界面演化过程进行直接观测,尝试通过对界面的直接观察获得气泡演化的典型特征,获得涡环结构的直观依据。

2　实验方法

实验是在卧式激波管上进行的,它由高压段、低压段、实验段和尾段组成(见图 1)。实验段截面为 5 cm×5 cm 的正方形,一侧有供观测的玻璃窗口。为了产生特定强度的激波,低压段和实验段的初压保持常压,高压段则根据需要改变压强。高、低压两段间使用一层或多层聚酯薄膜隔开,通过瞬间强电流产生的热量破膜产生激波。装置的原理及参数计算方法可以参考文献[10]。

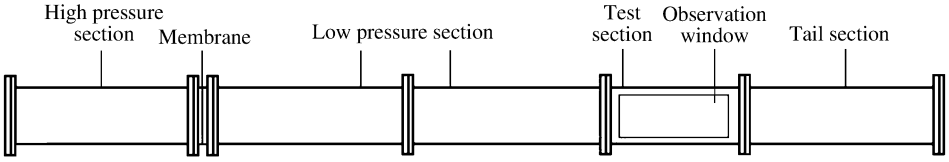


图 1　激波管装置示意图

Fig. 1　Sketch of shock tube

测试气体为特定气体,并通过烟雾机(常用于舞台表演)产生的烟雾颗粒对其染色,将吹制成形的肥皂泡(商用泡泡油)作为实验研究的球形气泡。图 2(a)为吹制气泡时使用的装置实物图,气泡通过装置末端的塑料圆管悬挂在实验段中部(见图 2(b))。由于测试气体中混有大量的烟雾颗粒,因此气泡在正常条件下呈现白色(见图 2(b)),对气泡界面起显示和示踪的效果,结合适当的照明,通过高速摄影机就可以直接观测到气泡界面的演化过程。

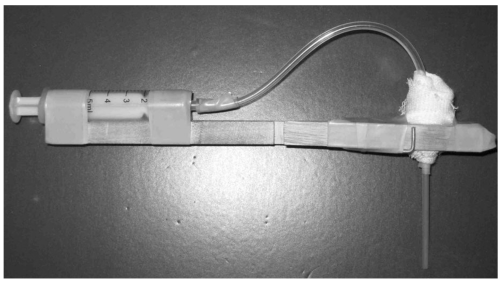


图 2(a)　吹制气泡使用的装置实物图

Fig. 2(a)　Bubble blowing device

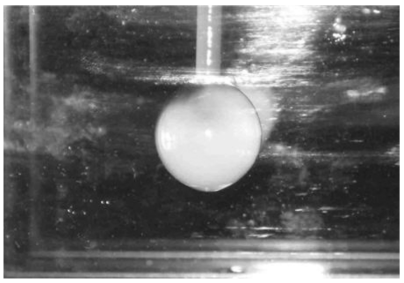


图 2(b)　实验段中吹制成形气泡的初始图像

Fig. 2(b)　Bubble initial state in the test section

轻气体气泡实验和重气体气泡实验分别采用不同的烟雾颗粒混合方式和照明手段,我们将分别对其进行简要介绍。

2.1　轻气体气泡实验

在轻气体气泡实验中,被烟雾颗粒染色的空气作为测试气体吹制气泡。为了获得气泡界面两侧较

大的密度阶跃，六氟化硫(SF_6，常温常压下密度约为空气的 5 倍)气体将替代激波管内的空气作为气泡界面外的环境气体。图 3 为实验中使用的测试系统示意图。实验时，氙气冷光源照射白色的漫散射屏，在实验段的一侧形成高亮度背景。由于气泡内的烟雾颗粒透光性较弱，气泡内气体扩散的区域在摄影机拍摄的图像中会显现与高亮度背景不同的暗色或阴影，这为直接捕捉界面的演变过程提供了可能。

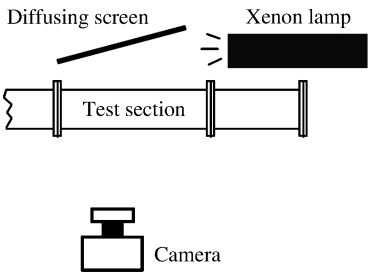


图 3 轻气体气泡实验平台及测试系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental set-up for light gas bubble

2.2 重气体气泡实验

采用被烟雾颗粒染色的 SF_6 气体作为测试气体吹制气泡。图 4(a)为 SF_6 气体和烟雾颗粒混合时使用的简易装置示意图。激波管内的环境气体为空气，这与本研究中轻气体气泡实验的相关配置正好相反。实验时，氙气冷光源发出的照明光线通过激波管尾段直接照射在气泡上，如图 4(b)所示。由于气泡内烟雾颗粒的米氏散射特性，气泡内气体扩散区域的亮度会比无扩散区域的亮度高很多，因此摄影机可以直接捕捉气泡界面的结构。

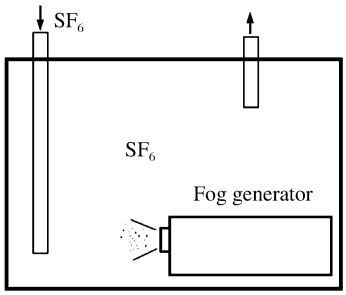


图 4(a) 重气体气泡实验混合烟雾颗粒装置示意图

Fig. 4(a) Schemetic diagram of the device of mixing smoke gas

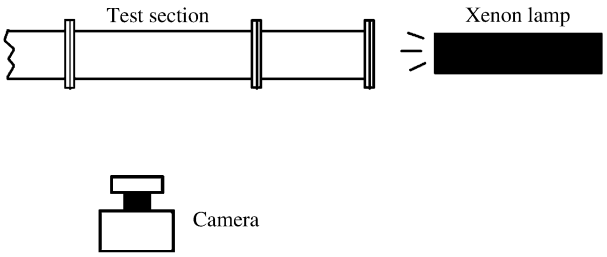


图 4(b) 重气体气泡实验测试系统示意图

Fig. 4(b) Schemetic diagram of diagnostic system for heavy gas bubble

3 实验结果及分析

3.1 实验特征参数

假设染色后的测试气体密度不发生改变，则实验的特征参数列于表 1。其中：M 为激波马赫数，A 为阿特伍德数，R 为气泡初始半径，w 为激波速度，下标“calc”代表一维气动力学关系式的计算结果，下标“expt”代表实验观测结果，上标“ * ”代表波后结果。

表 1 实验特征参数

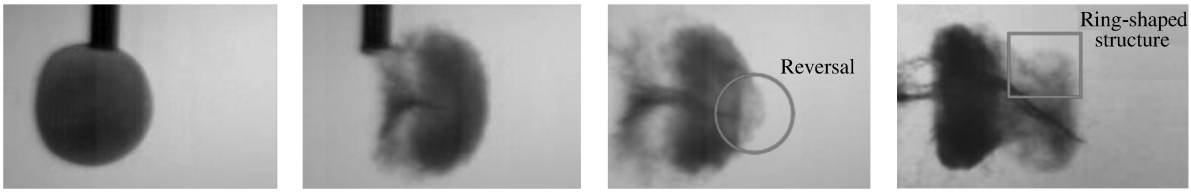
Table 1 Characteristic parameters of experiments

Case	Surrounding gas	Test gas	M_{expt}	A_{calc}	A^{*}_{calc}	R_{expt}/(cm)	w_{expt}/(m/s)
Light gas	SF_6	Air	1.22	−0.669	−0.756	0.55	165
Heavy gas	Air	SF_6	1.31	0.669	0.534	0.80	447

3.2 轻气体气泡实验

在轻气体气泡实验中，高速摄影机记录幅频为 $2\times10^4\ s^{-1}$。图 5 是单次实验获得的 4 幅 2.6 cm×2.0 cm的图像(为了突出细节，对图 5(d)进行了图像处理)，其中：$M=1.22$，$A_{calc}=-0.669$，激波加载气泡的前一幅图像为时间零点。从图中可以看出：初期气泡界面的迎风面(左面)在激波的压缩作用下向

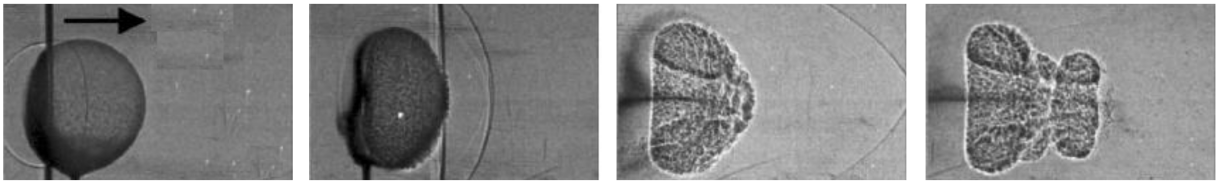
内弯曲(见图 5(a));随着时间的推移,迎风面的弯曲更加明显(见图 5(b)),并卷起形成涡环(简称迎风涡环),而背风面较好地保持了球面形状(见图 5(a)和图 5(b));由于迎风面比背风面运动得快,迎风面的部分界面反转穿透背风面形成第 2 个涡环(简称背风涡环,见图 5(c)和图 5(d))。进一步观察图 5(d)可知,在过球心并平行于图片的平面上,背风涡环是由上下两个圆环形结构组成,这也是首次在弱激波加载球形气泡实验中直接观察到背风涡环的几何形态。作为比较,我们给出了 Layes 等人[5]得到的激波与氦气泡相互作用的纹影实验结果($M=1.24$,$A=-0.745$),如图 6 所示。两组图片都是通过激波加载轻气体气泡实验获得的,比较气泡界面演化的各阶段,可以看出两者在几何形态上十分接近。



(a) 50 μs　(b) 200 μs　(c) 350 μs　(d) 650 μs

图 5　轻气体气泡演化实验图像

Fig. 5　Experimental images of a shocked air bubble in SF_6



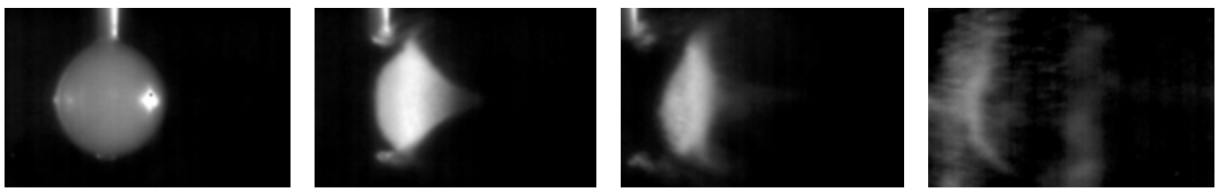
(a)　(b)　(c)　(d)

图 6　激波(空气)与氦气泡作用的纹影实验图片[5]

Fig. 6　Schlieren photographs for a helium bubble[5]

3.3　重气体气泡实验

在重气体气泡实验中,高速摄影机记录幅频为 1×10^4 s^{-1}。图 7 是单次实验获得的 4 幅 4.0 cm×2.5 cm的图像(为了突出细节,对图 7(d)进行了图像处理),其中:$M=1.31$,$A_{calc}=0.669$,激波加载气泡的前一幅图像为时间零点。观察图 7 可知:在激波的压缩作用下,气泡界面在背风面的轴线上形成了一个对称性极好的尖峰,而迎风面的形状变化并不明显(见图 7(b))。根据 Haas 等人的理论[4],这主要是由于气泡内气体的声速低于气泡外环境气体的声速,从而在背风面的轴线附近形成了聚心波加载。在实验的后期,由于现阶段实验条件的限制,伞状结构并没有完全捕捉到。同时还注意到,由于重力的作用,泡泡油在气泡底部聚集,形成微小的液滴,在激波加载下出现了小扰动和运动滞后的现象(见图 7(a)～图 7(c))。比较轻气体气泡的实验结果,可以看出两者在演化形态上存在很大的差异。现在普遍的观点认为,这是由于轻气体气泡和重气体气泡界面上的密度梯度方向不同,导致了在激波加载下产生方向相反的斜压涡量分布[4-6]。作为对比,还给出了 Layes 等人的氪气泡实验结果($M=1.10$,$A=0.51$)[5-6],如图 8 所示。可以看出,两者在实验的初期很相似。



(a) 50 μs　(b) 200 μs　(c) 350 μs　(d) 650 μs

图 7　重气体气泡演化实验图像

Fig. 7　Experimental images of a shocked SF_6 bubble in air

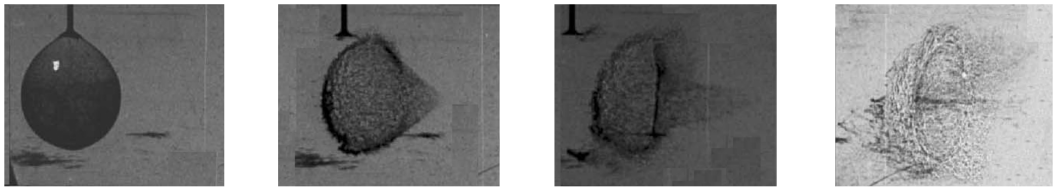


图 8 激波与氪气泡作用的纹影实验图像[5-6]

Fig. 8 Schlieren photographs for a krypton bubble[5-6]

3.4 实验分析

无论是纹影实验还是本实验都无法直接得到流场中的速度分布信息。在本研究中我们将尝试使用固体力学实验中广泛应用的相关分析方法对轻气体气泡的实验数据进行处理。通过图像匹配方法分析相邻两幅实验图像变形前后的散斑图像,跟踪图像上几何点的运动得到位移场,进而获得全场的速度分布[11]。图 9 是相关分析中使用的实验图像的灰度图,其中:图 9(a)为激波加载前气泡的初始图像,图 9(b)为激波加载后气泡变形后的图像。两幅图像都是从相同的坐标系中截取的,拍摄时间间隔为 0.05 ms。结合流场中的激波速度,可以得到激波实际加载在气泡上的时间仅为 0.010 9 ms。大量的理论和实验结果表明,激波波阵面在轻气体气泡内以发散的形式向前传播,并且沿过球心的水平线对称分布;这种单方向的加载使气泡界面在横向上只沿一个方向运动,这点在相关分析得到的横向位移分布图得到了印证(见图 10(a))。同时激波传播沿过球心的水平线具有对称性,图 10(b)就充分地说明了这一点,在水平线两侧分别有一个极大值点和极小值点,且符号相反。从图 11(a)的相关系数分布图可以观察到,在水平线附近相关性达到最小值,这是由于激波波阵面在水平线上具有最大位移的缘故,由于激波加载方向无法保证绝对水平,所以存在着一定偏差。结合横向位移分布和纵向位移分布,还可以进一步得到气泡内的位移矢量分布图,如图 11(b)所示。从图中可以看出:位移矢量分布与流场中的速度分布成正比;激波的发散传播会导致波后速度矢量方向分别沿水平线两侧向前发散;位移矢量的绝对值最大值约为 0.085 8 cm,而图像中单一像素点的分辨率约为 0.010 5 cm,结合二者就可以初步估计出实际位移矢量的绝对值最大值约为(0.085 8±0.010 5) cm;由实际的激波加载时间0.010 9 ms,可以进一步估算出激波波后的气体速度为(78.7±9.6) m/s,由一维冲击动力学关系式粗略计算得到的同等强度激波加载 SF_6/Air 平面交界面的波后气体运动速度为 78.2 m/s[12],可以看出两者

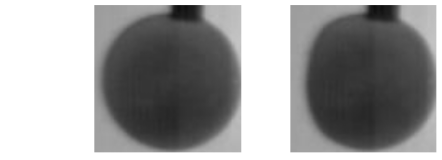


图 9 相关分析中的参考图像和目标图像

Fig. 9 The reference image and target image in correlation analysis

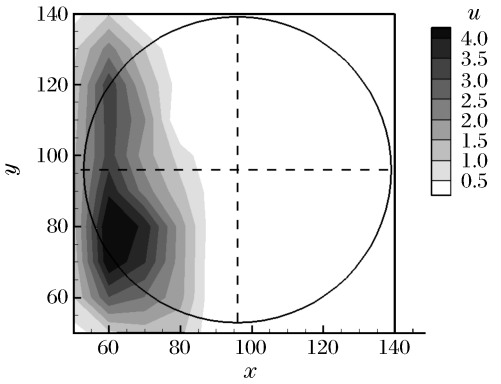


图 10(a) 横向位移

Fig. 10(a) Horizontal displacement

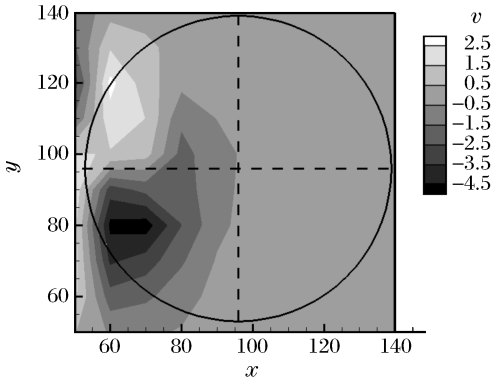


图 10(b) 纵向位移

Fig. 10(b) Vertical displacement

比较接近。考虑到目前可供处理的实验数据较少,因此该方法的合理性还有待进一步检验。

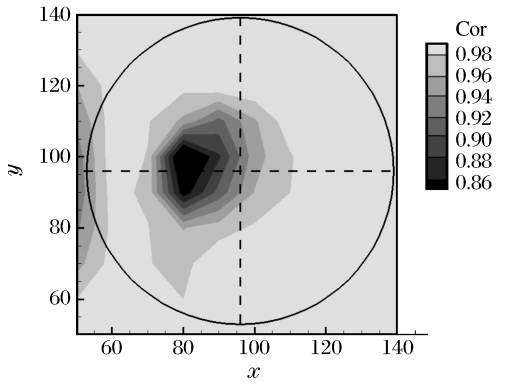


图 11(a)　相关系数

Fig. 11(a)　Correlation coefficient

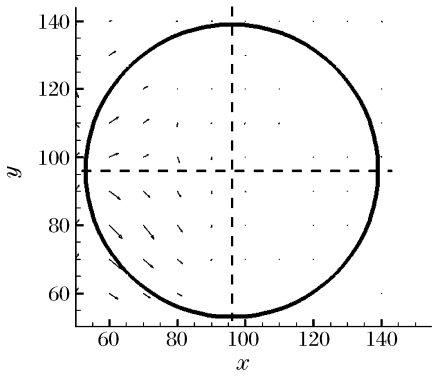


图 11(b)　位移矢量

Fig. 11(b)　Displacement vector

4　结　论

(1) 在激波加载气泡研究中引入烟雾颗粒染色方法,分别得到了激波加载轻气体气泡和重气体气泡演化过程中典型的界面结构,虽然在实验结果的分辨率上不及通过纹影系统得到的实验结果,也无法分辨激波的形态,但是烟雾颗粒法在实验中的使用为今后在球形气泡实验中引入更为精确的平面激光诱导荧光技术(PLIF)、激光粒子图像测速技术(PIV)等实验测试系统提供了布撒示踪粒子的切实可行的方案,使进一步研究成为可能。

(2) 在轻气体气泡实验中,直接辨别了弱激波加载轻气体气泡中背风涡环的环状几何结构,这有别于纹影实验的成像结果,对于了解气泡内气流的混合过程有一定帮助。

(3) 使用散斑相关方法分析了轻气体气泡演化初期的位移场,得到的结果与理论计算结果较吻合;今后可以基于更精确和细致的实验结果,得到不同时刻全流场的速度分布信息。

(4) 重气体气泡的实验方案还有待进一步改进,以获得气泡后期演化的详细信息。

实验工作是在畅里华、熊学仕、肖振飞、龚晏青、黄淑萍、高　宁、林　俊、尚海林、赵玉刚、王　涛、蒲正美等同事的帮助下完成的,谨表谢意。

References:

[1] Brouillette M. The Richrmyer-Meshkov Instability [J]. Annu Rev Fluid Mech,2002,34:445-468.

[2] Yan C L,Sun D J,Yin X Y,et al. Numerical Simulations of Richtmyer-Meshkov Inastability [J]. Chinese Journal of Computational Physics,2001,18(1):27-32. (in Chinese)
严长林,孙德军,尹协远,等. Richtmyer-Meshkov 不稳定性的数值模拟 [J]. 计算物理,2001,18(1):27-32.

[3] Rudinger G,Somers L M. Behaviour of Small Regions of Different Gases Carried in Accelerated Gas Flows [J]. J Fluid Mech,1960,7:161-176.

[4] Hass J F,Sturtevant B. Interaction of Weak Shock Waves and Discrete Gas Inhomogeneities [J]. J Fluid Mech,1987,181:41-76.

[5] Layes G,Jourdan G,Houas L. Distortion of a Spherical Gaseous Interface Accelerated by a Plane Shock Wave [J]. Phys Rev Lett,2003,91(17):174502.

[6] Layes G, Jourdan G, Houas L. Experimental Investigation of the Shock Wave Interaction with a Spherical Gas Inhomogeneity [J]. Physics of Fluids, 2005, 17: 028103.

[7] Fu D X, Ma Y W, Li X L. Direct Numerical Simulation of Three-Dimensional Richtmyer-Meshkov Instability [J]. Chinese Physics Letters, 2008, 25(1): 188-190.

[8] Wang T, Bai J S, Li P. Two-Dimensional Numerical Simulation of Gas/Liquid Interface Instability [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2008, 22(3): 298-304.
王 涛, 柏劲松, 李 平. 二维气/液界面不稳定性数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2008, 22(3): 298-304.

[9] Zhuo Q W, Shi H H. Experimental Study of Richtmyer-Meshkov Instability at a Gas/Liquid Interface in a Shock Tube [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2007, 21(1): 25-30. (in Chinese)
卓启威, 施红辉. 气/液界面上 Richtmyer-Meshkov 不稳定性的实验研究 [J]. 实验流体力学, 2007, 21(1): 25-30.

[10] Chen Q. The Theory and Experimental Technique of Shock-Tube Flow [M]. Hefei: China University of Science and Technology, 1979. (in Chinese)
陈 强. 激波管流动的理论和实验技术 [M]. 合肥: 中国科技大学, 1979.

[11] Chen J D. Studies on Theory and Application of Digital Speckle Correlation Method [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. (in Chinese)
陈俊达. 数字散斑相关方法理论和应用研究 [D]. 北京: 清华大学, 2007.

[12] Li W X. One-Dimensional Nonsteady Flow and Shock Waves [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
李维新. 一维不定常流与冲击波 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

Experimental Investigation on Spherical Bubble Evolution Loaded by a Weak Planar Shock Wave

GUO Wen-Can, LIU Cang-Li, TAN Duo-Wang, LIU Jin-Hong,
ZOU Li-Yong, ZHANG Guang-Sheng

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

Abstract: The interaction of a shock wave with a spherical gaseous interface (soap bubble) was observed directly by a high-speed camera. To trace the picture of the interface, white droplets were used to dye the test gas inside the bubble. Light gas bubble and heavy gas bubble under weak planar shock waves loading were studied. The geometrical characteristics of bubble evolution were obtained, and the ring-shaped structure in the light gas bubble was observed for the first time. We also analyzed the distribution of the displacement for the light gas bubble with the correlation method. The results agree quite well with the theoretical analysis. The successful usage of droplets encourages the introduction of more accurate diagnostic system like planar laser induced fluorescence (PLIF) or particle image velocimetry (PIV) into experiments in the future.

Key words: shock wave; Richtmyer-Meshkov instability; bubble; trace; correlation method