DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0087-06

反射激波作用重气柱的 Richtmyer-Meshkov 不稳定性的实验研究*

廖深飞,邹立勇,刘金宏,柏劲松,王彦平
(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 621999)

摘要: 采用高速摄影结合激光片光源技术,研究了反射激波冲击空气环境中重气体(SF_6)气柱的 Richtmyer-Meshkov 不稳定性。通过在横式激波管试验段采用可移动反射端壁获得不同反射距离,实现了反射激波在不同时刻二次冲击处于演化中后期的气柱界面,得到了不同的界面演化规律。反射距离较小时,斜压机制对气柱界面形态演化的影响显著,界面衍生出二次涡对结构;反射距离较大时,压力扰动机制的影响显著,界面在流向上被明显地压缩,没有形成明显的涡结构。由气柱界面形态的时间演化图像得到了界面位置和整体尺度随时间的变化,对反射激波作用后气柱界面的演化进行了量化分析。

关键词: 流体力学;Richtmyer-Meshkov 不稳定性;反射激波;气柱;斜压涡量;涡
中图分类号: O357.4 **国标学科代码**: 1302531 **文献标志码**: A

当激波作用于两种不同流体的界面时,由于密度梯度和压力梯度方向的不一致,将在界面上产生斜压涡量,导致界面上任何微小扰动的放大,这种现象为 Richtmyer-Meshkov (RM) 界面不稳定性[1-2]。RM 不稳定性在天体物理学,如超新星爆发及星系演化模型的构建、高超声速燃烧、爆燃至爆轰的转变等领域,具有重要的科学研究和工程应用价值。近年来,由于其在惯性约束核聚变中的重要作用更是备受关注。M. Brouillette[3]对 RM 不稳定性的理论和实验研究进行了综述。利用激波管装置开展 RM 不稳定性的实验研究,可以提供可靠的实验数据,验证工程物理模型及数值程序[4],激波冲击气柱的 RM 不稳定性便是其中的典型实验。

平面激波冲击圆形气柱,涵盖了密度梯度和压力梯度之间所有可能的夹角,同时气柱构型简单,在激波冲击下又能发展出高度非线性行为,有望在二维情况下提炼出规律性的结果,因此是研究 RM 不稳定性的良好手段。R. Samtaney 等[5]对这类问题进行了理论分析,J. W. Jacobs[6]则首次利用层流方法在实验上实现了无膜气柱,发现涡对结构主导了气柱界面的非线性演化阶段,观察到演化后期如 Kelvin-Helmholtz 等二次不稳定性的出现。Jacobs 无膜气柱方法被广泛用以研究不稳定性演化过程中气柱界面整体尺度增长率[7]、二次不稳定性的产生以及混合转捩的标度演化规律及其引发机制[8-10]等。

在涉及 RM 不稳定性的实际应用中,界面往往要经历多次激波加载。在惯性约束核聚变中,球壳在外部辐照下,加热烧蚀并产生驱动球壳内爆的球面汇聚激波,激波到达靶丸中心时反射并向外传播,再次作用于已经发生 RM 不稳定性的烧蚀表面[11]。研究表明,反射激波会显著加快混合区宽度的增长[12-13],反射激波提供的额外能量还可能促进流场更大尺度范围的能量耗散,使界面演化提前进入混合转捩过程[14-16]。王显圣等[17]对反射激波作用处于演化早中期的气柱界面进行了数值研究。目前,反射激波作用单气柱的实验研究鲜见报道。本文中,针对反射激波作用处于演化中后期的气柱界面的 RM 不稳定性进行实验研究,探讨反射激波对界面形态、位置及尺度演化的影响。

1 实 验

激波冲击重气体(SF_6)气柱的实验,是在横截面为 100 mm×100 mm 的横式激波管中进行的,如图

* **收稿日期**: 2014-06-27; **修回日期**: 2014-11-25
基金项目: 国家自然科学基金项目(11172278,11302201,11202195,11472253)
第一作者: 廖深飞(1985—),男,博士,助理研究员,sfliao@caep.cn。

1 所示。通过电破膜方式瞬时破膜后，驱动段中的高压氮气冲击被驱动段中一个大气压的空气，产生从左向右传播的平面激波。入射激波冲击气柱后，将在实验段尾端的固壁处反射，形成从右向左传播的反射激波，并二次冲击演化中的气柱界面。为研究反射激波对气柱演化的影响，实验段尾端的固壁设计成由方形铝块和螺栓组成的可移动反射端壁。铝块与试验段接触的表面采用间隙很小的滑动配合，末端利用螺栓与试验段尾部的固定法兰连接。定义激波反射距离 L_0 为初始气柱中心至反射端壁的距离，通过调节螺栓伸入试验段的距离即可改变 L_0。

圆形重气柱界面的生成采用无膜界面生成技术[18-19]。先向试验段上方的气箱中充入 SF_6 气体，利用烟雾发生器产生白色乙二醇烟雾(粒子平均直径约为 0.5 μm)作为示踪粒子，经气箱底部充入气箱与 SF_6 混合。由于 SF_6 密度约为空气的 5 倍，混合气体在重力作用下将自上而下流动，经过试验段上方直径 D_0 为 6 mm 的圆柱形喷嘴后，在试验段中形成垂直方向的圆形气柱。通过调节气箱阀门可以调整混合气体的流速，从而控制气柱的稳定性。SF_6 气柱的流速(约 0.1 m/s)远小于激波速度(约 400 m/s)和波后气流速度(约 100 m/s)，因此气柱界面在激波作用下的演化可认为是准二维的。

采用高速摄影结合激光片光源技术，观察气柱界面形态的演化。利用序列 DPL 激光器产生 30 个序列激光脉冲，单脉冲能量约为 200 mJ、脉宽 8 ns。激光通过片光透镜后，形成厚度约为 1 mm 的片光。为选择片光中强度和厚度更均匀的部分，采取片光从试验段尾端进入而非侧方进入的方式，透过反射端壁上的 K9 玻璃后照射流场，如图 1 所示。片光平面距离圆柱形喷嘴出口约 25 mm。高速摄像机安装在试验段正上方沿垂直于片光平面的方向，对流场进行动态观察，拍摄速率为 10^4 s^{-1}。

共考虑了 5 种反射距离 L_0，相应的量纲一反射距离为 $l_0 = L_0/D_0 = 17, 20, 25, 30, 35$。入射激波马赫数 $Ma = 1.217 \pm 0.003$。约定入射激波运动方向(从左至右)为正方向，反射激波运动方向(从右至左)为负方向。

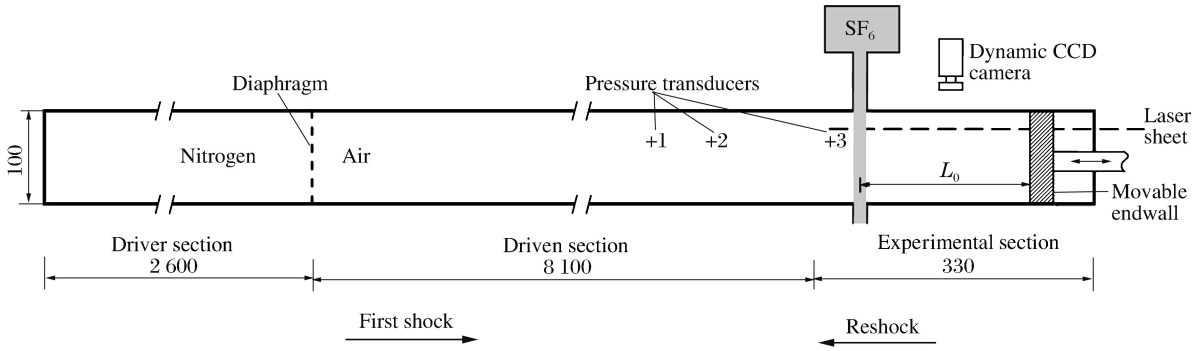

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

2 结果与讨论

2.1 界面形态

平面入射激波及反射激波作用后气柱界面形态的演化，如图 2 所示。入射激波作用后，气柱界面在斜压涡量的诱导下卷曲，形成由两个强度相当、旋转方向相反的涡组成的涡对结构(a1～a2)。当反射激波作用演化中的气柱界面时，反射距离越大，作用前界面经历的演化时间越长。为描述方便，界面中靠近高压段部分称为左界面，靠近反射端壁部分称为右界面。反射距离较小时(如 $l_0 = 17$)，反射激波作用后，右界面逐渐衍生出二次涡对结构，其旋转方向与初始涡对结构旋转方向相反(a3～a7)。二次涡对结构的出现应该是反射激波与气柱右界面相互作用产生的斜压涡量所致。反射激波作用前气柱右界面呈较为圆滑的弧形(a2)，且此时 SF_6 扩散较小界面两侧仍具有较大的密度梯度，由二维涡量动力学方程可知，反射激波作用后，界面上将产生与初始涡量方向相反的涡量，诱导界面向与初始绕卷方向相反的方向绕卷，并最终演化成二次涡对结构。二次涡对结构的尺度在界面的整个发展过程中逐渐增大(a4～

a13)。由于反射激波引起的压力扰动及二次涡量的反向，反射激波作用后界面的流向运动速度明显降低(a3～a7)，右界面速度几乎为零，左界面也只有较小的负速度。随着界面进一步发展，右界面获得了很小的正速度，左界面依然保持较小负速度，初始涡对结构与二次涡对结构逐渐分离(a8～a13)。在演化后期，初始涡对结构逐渐破碎并与周围空气混合，而二次涡对结构依然清晰。其中可能的原因是，反射激波作用后二次涡对结构聚集了大量的涡量，而初始涡对结构中初始涡量与二次涡量的相互作用促进了涡量的耗散(a3～a4)。

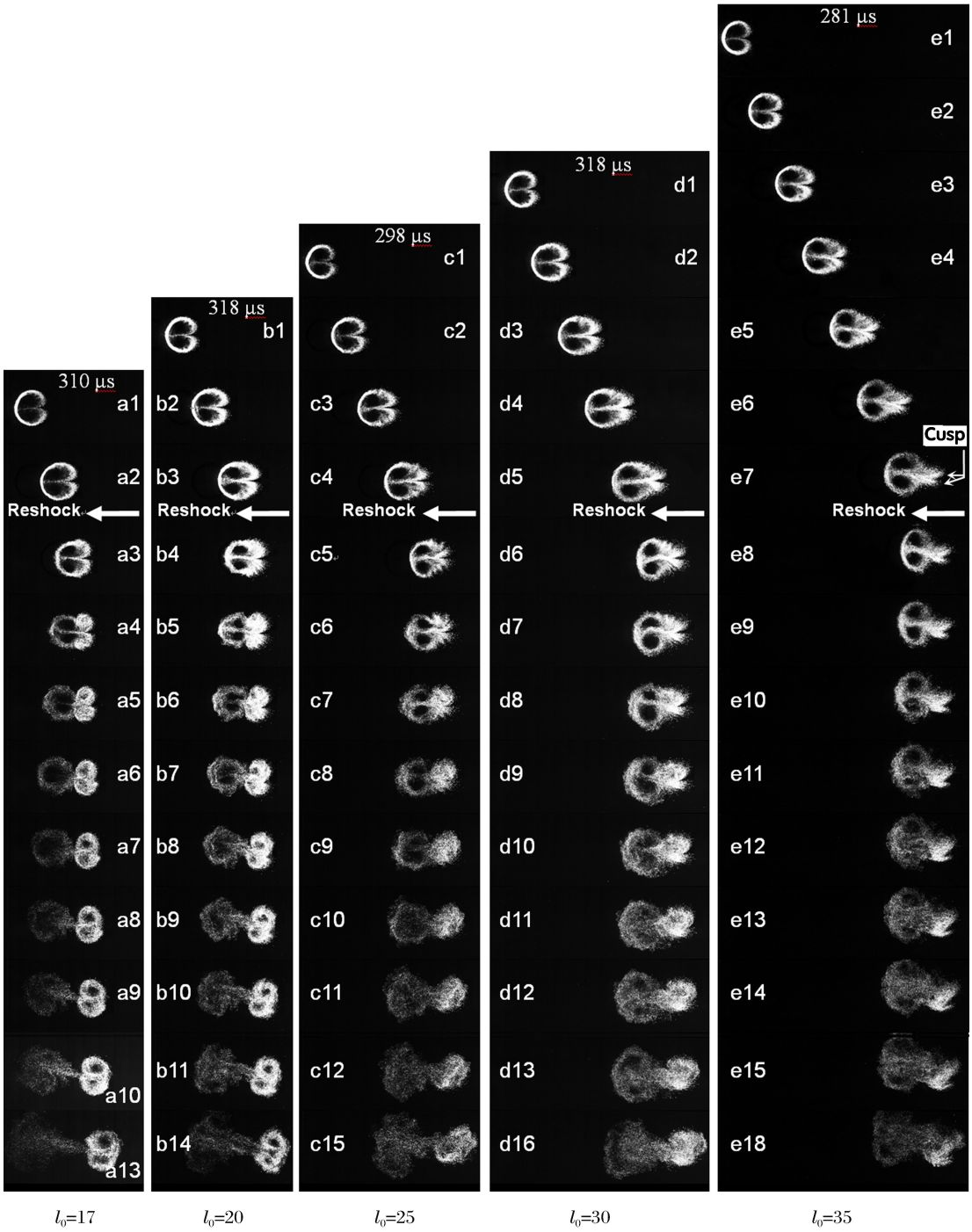

图 2　不同反射距离时气柱界面形态的演化(每幅间隔 100 μs)

Fig. 2　Morphological evolution of gas cylinder at different endwall distances (100 μs for each interval)

随着反射距离的增大(如 $l_0=25$),反射激波作用前界面演化时间更长,此时右界面不再是圆滑的弧形,而是向反射端壁前突(c4)。反射激波作用后,界面在流向上被一定程度地压缩(c5)。右界面没有衍生出二次涡对结构,而是在涡量诱导下逐渐与周围空气混合(c6～c9),尺度也逐渐增大,并慢慢与初始涡对结构分离(c10～c15)。

当反射距离较大时(如 $l_0=35$),反射激波作用前右界面明显地向反射端壁方向衍生出两片尖瓣(e7)。反射激波作用后,界面在流向上被明显地压缩(e8),右界面没有衍生出二次涡对结构,且此后尖瓣演化缓慢(e8～e11),直至演化后期,左右界面的分离也不明显(e18)。

2.2 界面位置及尺度

由气柱界面形态的演化图像,还可以进一步量化表征界面的变形。不同反射距离下气柱界面在流向上的位置变化及线性拟合线,如图 3 所示,其中界面位置的参考点取的是摄像机拍摄范围中流向上的起点,x_L 和 x_R 分别为左右界面的位置。反射激波作用前,气柱左右界面均呈线性发展,且所有实验的界面运动速度一致,这说明实验具有很好的可重复性。

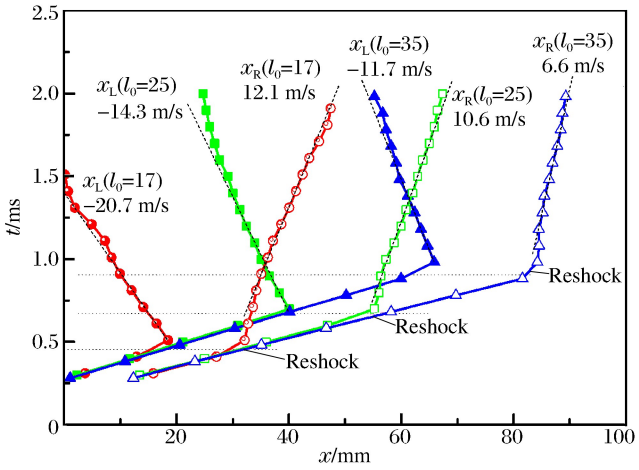

图 3 气柱界面在流向上的位置

Fig. 3 Streamwise position for gas cylinder

反射激波一旦作用右界面,右界面的运动发生显著变化,大体上可分为两个阶段。第 1 个阶段是缓慢运动阶段,持续约 250 μs,此时右界面的运动速度相比反射激波作用前大幅减小,如 $l_0=35$ 时右界面的速度几乎为零;第 2 个阶段是匀速运动阶段。从固定端壁反射回来的反射激波作用界面,压力扰动的影响势必导致界面运动速度显著减小,同时反射激波与界面相互作用导致斜压涡量的产生,也将诱导界面运动。因此右界面第 1 个阶段的运动,主要是压力扰动机制和斜压机制共同主导。第 2 阶段的运动则主要是涡量主导的,即斜压机制起主导作用。从图 3 可以看到,反射激波作用后,$l_0=17$ 时右界面的运动速度大于 $l_0=35$ 时的速度,这和 $l_0=17$ 时右界面在涡量诱导下形成二次涡对结构、而 $l_0=35$ 时右界面没有形成明显涡结构有直接关系。

反射激波从右界面传播至左界面需要一定时间,因此反射激波作用右界面时,左界面的运动并没有立刻发生变化,而是依然沿正方向运动。不同于右界面始终沿正方向运动,反射激波作用左界面后,左界面开始沿负方向运动,且前期基本匀速运动。

界面整体尺度是描述 RM 不稳定性混合问题的一个重要参数。量纲一界面宽度(流向上的尺度)W/D_0 和高度(展向上的尺度)H/D_0 随时间的变化,如图 4 所示,图中时间零点对应于反射激波作用气柱右界面的时刻。反射激波作用前后气柱左右界面在流向上均匀速运动(见图 3),因此界面宽度均线性增长。反射激波作用前,界面宽度增长率基本一致;反射激波作用后,反射距离越大,反射激波对界面的压缩效应越明显,界面宽度增长率越小。反射激波对界面高度增长率的影响,在反射距离较大(如 $l_0=30,35$)时并不明显,而当反射距离较小(如 $l_0=17,20$)时,反射激波作用后的早期,界面高度增长缓慢甚至出现下降,这主要是反射激波作用后右界面衍生出的二次涡对结构与初始涡对结构相互作用导致的。整体上,界面高度由初始涡对的高度决定(见图 2),但当反射距离较小时,反射激波作用后右界面衍生出二次涡对结构,由于二次涡对结构旋转方向与初始涡对旋转方向相反,在二次涡对结构的卷吸作用下,初始涡对高度下降(见图 2 中 a4、b5),此时界面高度由二次涡对结构决定,而二次涡对结构尚未充分发展,因此界面高度下降。当反射距离较大时,反射激波作用后右界面没有衍生明显的涡结构,对初始涡对的影响较小。

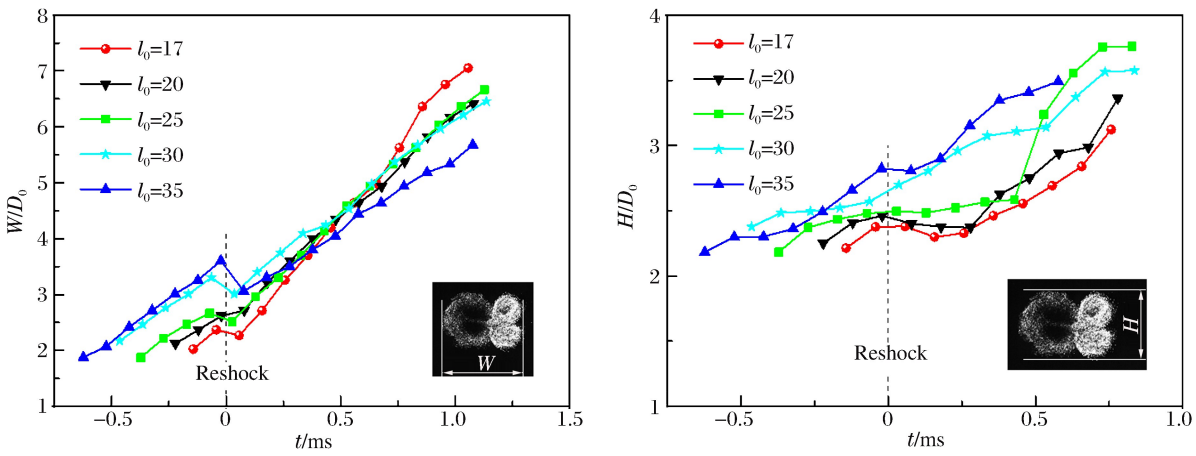

图 4　气柱界面宽度和高度

Fig. 4　Interface width and height of gas cylinder

3　结　论

通过在横式激波管试验段采用可移动反射端壁实现反射激波作用不同演化时刻的重气柱，研究了反射激波冲击处于演化中后期气柱界面的 RM 不稳定性。反射距离较小时，斜压机制对气柱界面形态演化的影响显著，右界面衍生出二次涡对结构；反射距离较大时，压力扰动机制的影响显著，界面在流向上被明显地压缩，没有形成明显的涡结构。反射激波的作用，引入了新的压力扰动和斜压涡量，使右界面的运动发生显著变化，大体上可分为缓慢运动和匀速运动两个阶段。反射距离越大，反射激波对界面的压缩效应越明显，界面宽度的增长率越小。这些结果表明，反射距离不同，反射激波作用时气柱界面的形状就不同，界面两侧的密度梯度也可能存在差异，因而直接影响反射激波的折射以及界面上二次涡量的产生和分布，进而影响界面的后期演化。

参考文献：

[1]　Richtmyer R D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 1960,13(2):297-319.

[2]　Meshkov E E. Instability of the interface of two gases accelerated by a shock wave[J]. Fluid Dynamics, 1969,4(5):101-104.

[3]　Brouillette M. The Richtmyer-Meshkov instability[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2002,34(1):445-468.

[4]　Benjamin R F. An experimenter's perspective on validating codes and models with experiments having shock-accelerated fluid interfaces[J]. Computing in Science and Engineering, 2004,6(5):40-49.

[5]　Samtaney R, Zabusky N. Circulation deposition on shock-accelerated planar and curved density-stratified interfaces: Models and scaling laws[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1994,269(12):45-78.

[6]　Jacobs J W. The dynamics of shock accelerated light and heavy gas cylinders[J]. Physics of Fluids, 1993,5(9):2239-2247.

[7]　Prestridge K, Zoldi C A, Vorobieff P, et al. Experiments and simulations of instabilities in a shock-accelerated gas cylinder[C]// Schilling O. Proceedings of the 8th International Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing. Lawrence Livermore National Laboratory, 2001:36.

[8]　Vorobieff P, Mohamed N G, Tomkins C, et al. Scaling evolution in shock-induced transition to turbulence[J]. Physical Review E, 2003,68(6):065301.

[9]　Vorobieff P, Tomkins C, Kumar S, et al. Secondary instabilities in shock-induced transition to turbulence[J]. Advances in Fluid Mechanics, 2004,40:139-148.

[10]　Tomkins C, Kumar S, Orlicz G, et al. An experimental investigation of mixing mechanisms in shock-accelerated

flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008,611(3):131-150.

[11] Pfalzner S. An introduction to inertial confinement fusion[M]. Boca Raton: CRC Press, 2006.

[12] Brouillette M, Sturtevant B. Experiments on the Richtmyer-Meshkov instability: Small-scale perturbations on a plane interface[J]. Physics of Fluids, 1993,5(4):916-930.

[13] Vetter M, Sturtevant B. Experiments on the Richtmyer-Meshkov instability of an air/SF_6 interface[J]. Shock Waves, 1995,4(5):247-252.

[14] Balakumar B, Orlicz G, Tomkins C, et al. Simultaneous particle-image velocimetry-planar laser-induced fluorescence measurements of Richtmyer-Meshkov instability growth in a gas curtain with and without reshock[J]. Physics of Fluids, 2008,20:124103.

[15] Balakumar B J, Orlicz G C, Ristorcelli J R, et al. Turbulent mixing in a Richtmyer-Meshkov fluid layer after reshock: Velocity and density statistics[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2012,696:67-93.

[16] Tomkins C, Balakumar B, Orlicz G, et al. Evolution of the density self-correlation in developing Richtmyer-Meshkov turbulence[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2013,735:288-306.

[17] 王显圣,司廷,罗喜胜,等.反射激波冲击重气柱的 RM 不稳定性数值研究[J].力学学报,2012,44(4):664-672.
Wang Xiansheng, Si Ting, Luo Xisheng, et al. Numerical study on the RM instability of a heavy-gas cylinder interacted with reshock[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012,44(4):664-672.

[18] 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.
Zou Liyong, Liu Jinhong, Tan Duowang, 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.

[19] Zou L Y, Liu C L, Tan D W, et al. On interaction of shock wave with elliptic gas cylinder[J]. Journal of Visualization, 2010,13(4):347-353.

Experimental study of Richtmyer-Meshkov instability in a heavy gas cylinder interacting with reflected shock wave

Liao Shenfei, Zou Liyong, Liu Jinhong, Bai Jingsong, Wang Yanping

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: The Richtmyer-Meshkov (RM) instability in a heavy gas (SF_6) cylinder surrounded by ambient air is experimentally studied using a high-speed video camera in combination with a laser sheet. The evolving gas cylinder at intermediate to later stages was reshocked by the reflected shock wave at different times along with the changes of the endwall distance, which was achieved by designing a movable endwall for the test section in a horizontal shock tube. It is demonstrated that different endwall distances result in different evolutions of the reshocked interface. For a short endwall distance, the effect of the baroclinic mechanism on the interface evolution is significant and a secondary vortex pair is formed, while for a long endwall distance, the effect of the pressure perturbation mechanism is significant and the streamwise compression of the interface instead of vortex structure is clearly observable. In addition, quantitative analysis is conducted by measuring the position and the integral scale of the interface from sequences of images.

Key words: fluid mechanics; Richtmyer-Meshkov instability; reflected shock wave; gas cylinder; baroclinic vorticity; vortex

(责任编辑 丁 峰)