

文章编号: 1001-4888(2017)06-0733-08

柱状汇聚激波冲击单模气体界面的实验研究^{*}

李阳, 丁举春, 翟志刚, 司廷

(中国科学技术大学 近代力学系先进推进实验室, 合肥 230027)

摘要: 在自行设计和加工的半环形汇聚激波管中, 开展了柱状汇聚激波冲击单模 Air/SF₆ 气体界面的 Richtmyer-Meshkov(RM)不稳定性实验研究。不同于以往的环形激波管, 该激波管具有半圆形结构的实验段, 使半环形管道和实验段都向外敞开, 能够参考传统水平激波管的方式设置初始扰动界面和观测系统。采用线约束肥皂膜的方法形成单模初始扰动界面。利用高速纹影成像技术得到了柱形汇聚激波作用下界面演化的完整过程。为了研究初始振幅对界面演化形态的影响, 实验中生成了三种不同初始振幅的单模界面, 并获得了三种工况下界面位移和扰动振幅随时间的变化。结果表明, 汇聚激波作用下的 RM 不稳定性与平面激波有很大差别, 主要原因在于汇聚效应, 包括结构汇聚、流动压缩以及界面反相等。

关键词: 柱状汇聚激波; Richtmyer-Meshkov 不稳定性; 单模界面; 高速纹影法

中图分类号: O354.5

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-094

0 引言

当激波作用于具有初始扰动的两种不同流体的界面时, 密度梯度和压力梯度的方向不一致导致了斜压涡量的产生和发展, 并伴随复杂的流体动力学现象, 从而使得界面失稳、扰动幅度增长, 并最终形成湍流混合。这种由激波引起的界面不稳定性被称作 Richtmyer-Meshkov(RM)不稳定性^[1,2], 在科学和工业领域有广泛应用, 如惯性约束核聚变(ICF)^[3]、超新星爆发^[4]、激波碎石^[5]和超音速喷气飞机燃料混合^[6]等。国际上各国的研究者都对 RM 不稳定性问题展开了相关研究^[7-9], 我国在该方面也取得了一些进展^[10-12], 我们课题组亦开展了大量工作^[13-15]。

在过去的几十年中, 利用激波管形成的平面激波在 RM 不稳定性研究中发挥了巨大作用, 而由于汇聚激波波后流场的非均匀性, 要形成一道形态可控的汇聚激波十分困难。在 ICF 的研究中, 汇聚激波对靶丸点火起到关键作用。但是在前人的研究中, RM 不稳定性实验工作大多集中于平面激波, 而关于汇聚激波作用下的 RM 不稳定性研究则进展缓慢。在 Perry 和 Kantrowitz^[16]的开拓性工作中, 他们将水滴形内芯和圆柱形外壳结合在一起, 用以产生圆柱状汇聚激波。Hsing^[17]等首次通过辐射引发内爆, 开展了汇聚激波与十二边形界面的作用实验, 研究了不稳定性的演化以及汇聚效应。Apazidis 小组^[18,19]使用圆锥状实验段研究了柱状激波的特性。Kumar 等^[20]在大型扇形汇聚激波管中开展了汇聚激波与多模界面的作用实验, 解释了区域收缩效应, 并和前人工作进行了比较。Holder 等^[21]在扇形汇聚激波管中通过多点点火研究了汇聚激波与轻-重-轻界面的作用, 获得了无扰动下的界面混合率和有扰动下的“尖钉”、“气泡”结构。Takayama 小组^[22,23]设计并改进了竖式同轴无隔膜激波管, 通过独立的自支撑结构在最小的初始扰动情况下生成圆柱形汇聚激波, 并得到了关于圆柱形汇聚激波与圆柱形界

^{*} 收稿日期: 2016-05-19; 修回日期: 2016-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(11272308, 11302219 和 NSAF U1530103)

通讯作者: 司廷(1983—), 男, 副教授。主要研究方向是实验流体力学和界面流体力学。Email: tsi@ustc.edu.cn

面相互作用的初步实验结果。2005 年,Fincke^[24,25]等在 OMEGA 系统通过实验研究了汇聚激波与单模、多模界面的相互作用,发现与平面情况下的扰动增长规律差异很大。此外,Dimotakis 和 Samtaney^[26]利用气体透镜技术在水平激波管中生成了圆柱形汇聚激波。Biamino 等人^[27,28]在气体透镜技术的基础上,得到了单模界面 RM 不稳定性的实验结果。Bond 等人^[29]对平面激波通过楔形结构的聚焦特性进行了研究。在我们之前的工作中^[30,31],将激波动力学理论应用于设计弧形墙轮廓,使平面激波转化为圆柱形激波,并在此激波管中实现了激波作用于气泡和气柱的相关实验^[32-34]。

通过前人的研究可以看出,目前主要有两种结构的汇聚激波管,利用环形激波管可成功生成完整汇聚激波,而结合了楔形实验段的普通激波管似乎更适合研究 RM 不稳定性,因为它们简化了设备结构。但是,前者在界面生成和流场观测方面存在一定难度,后者由于汇聚角度的限制,其楔形边界常常会对气体界面变形和激波发展产生较大影响^[26, 31-33]。为了克服这些缺点,并结合以上两种设备的优势,我们自行设计并加工了一个半环形汇聚激波管^[35]。这种激波管的设计遵循环形结构原理,但只保留环形管道和实验段的一半成为半环形,使得组装过程大为简化,气体界面形成和流场可视化也更为简单,为汇聚激波作用下的 RM 不稳定性研究提供了更为可靠的实验平台。

本文利用这种自主设计的半环形激波管,开展了汇聚激波冲击下气体界面的 RM 不稳定性实验研究,得到了不同振幅的单模扰动界面演化过程纹影图,对存在于汇聚激波演化过程中的几何效应进行了分析。

1 实验设备和方法

1.1 实验设备

半环形汇聚激波管的结构如图 1 所示。实验装置分为驱动段、被驱动段、转换段、实验段四个部分。驱动段(Driver section, 长度 1.2m, 中心半径 30mm)和被驱动段(Driven section, 长度 1.0m, 中心半径 30mm)中间由聚丙烯薄膜(Diaphragm)分离。实验段(Test section, 厚度 5mm)位于激波管尾端。被驱动段和实验段中间由几个部分组成的转换段衔接:转换段 I(Transformation section I, 长度 0.15m), 半圆形进气管道(Inlet pipe, 长度 0.5m, 中心半径 42.4mm), 转换段 II(Transformation section II, 长度 0.3m)和半环形通道(Semi-annular channel, 长度 0.45m, 内径 85mm, 外径 95mm)。在激波管设计中,不同部分的横截面面积几乎相同,且从被驱动段到实验段的转弯部分内表面平滑,以减少对激波运动的干扰。开始时,往驱动段充入空气使其内部压力不断增加,激波管其余部分保持一个大气压,当驱动段压力达到某一数值时,聚丙烯薄膜破裂,在该处形成一道平面激波。当激波通过转换段 I 和进气管,圆形激波变成半圆形激波。激波在通过转换段 II 之后以半环形激波进入半环形通道。最终,激波在实验段被整形为半圆形柱状激波。一方面,由于其独特的半环形结构,拍摄系统可以按照与平面激波管一样的方法来设置。另一方面,与楔形激波管的尖角固壁实验段相比,半圆形实验段保持了完整柱状激波的对称性,并且将固壁对流场的影响降至最小。

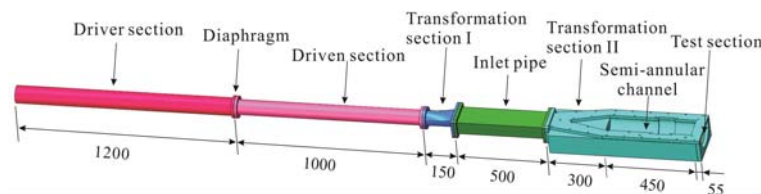


图 1 半环形汇聚激波管示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic of the semi-annular converging shock tube facility (unit: mm)

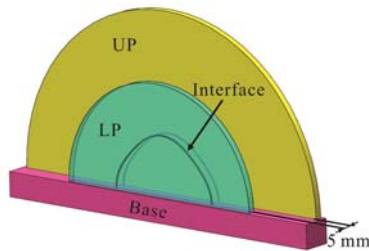
1.2 单模界面生成方法

半环形激波管具有类似传统水平激波管开放式的实验段,给初始扰动界面的设置提供了方便。本文中,我们采用线约束肥皂膜的方式生成单模气体界面。单模界面约束装置(图 2)分为上板(Upper plate, UP)、下板(Lower plate, LP)和底座(Base)三个部分,与实验段的观察窗能够契合。上、下板间距 5mm,在两板相对位置按照振幅需求镶嵌相同振幅的单模线条(宽度 0.4mm,高度 0.3mm)。不同振

幅工况采用不同振幅的镶嵌线条。向单模界面约束装置内吹入 SF_6 气体肥皂泡,在肥皂泡与上、下板接触并膨胀的过程中,因表面张力作用肥皂膜将与上板和下板垂直。继续通入 SF_6 气体,直到肥皂膜移动到单模线条的位置。利用这种线约束方法形成所需重气柱肥皂膜界面,保持肥皂膜与上板和下板垂直,然后将整个装置迅速插入与之契合的实验段内并固定。为了减小界面变形和肥皂膜界面两边的气体扩散,该装置一经固定即可开展相应的 RM 不稳定性实验。本文中,所用气体 SF_6 相对分子质量为 146,密度为 6.02g/L (实验温度 27°C)。实验所用单模界面在柱坐标系 (r, θ, z) 下表示为:

$$r = R_0 + a \sin(n\theta) \quad (1)$$

式中, $R_0 = 25\text{mm}$ 为单模界面中心位置的半径; a 为初始振幅; n 为波数, $\theta \in [0, \pi]$ 。为了维持初始界面的二维性,本文工作中取初始振幅 $a \ll R_0$ 的工况。当振幅较大时,生成的界面伴随有一定的三维性,而且肥皂膜因表面张力作用难以被镶嵌的线条约束,因此大振幅情况下的 RM 不稳定性不在本文的研究范畴。



UP, Upper plate; LP, Lower plate

图2 初始扰动界面生成装置

Fig. 2 Initially perturbed interface generation device

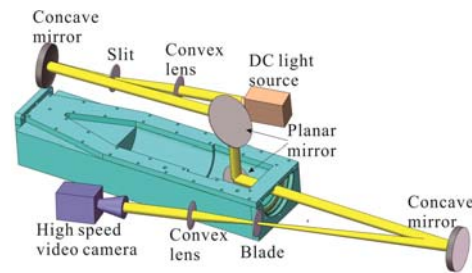


图3 高速纹影成像系统

Fig. 3 The high-speed schlieren photography system

1.3 界面观测方法

由于实验段呈半环形结构,且两侧的观察窗都处于开放式状态,因此拍摄系统可以按照与传统的平面激波管类似的方法来设置。在本实验中,我们采用改进的高速纹影法^[36]对柱状激波与单模界面的相互作用进行观测,拍摄整个过程中激波波系和界面演化的情况。实验观测系统如图3所示。实验过程中,强光源(DCR III型, SCHOTT North America)产生的光柱经过凸透镜、狭缝、凹面镜后,形成一束平行光沿水平方向穿过实验段。两个平行的平面镜分别放置在半环形通道内和竖直上方,将平行光投射到凹面镜,经过反射在刀口和凸透镜的作用下由高速摄影机(FASTCAM SA5型)拍摄流场信息。实验中高速摄影机的拍摄频率设为 87500fps (对应相邻两幅图的时间间隔约为 $11.4\mu\text{s}$),曝光时间设为 $1\mu\text{s}$,以期削弱因连续曝光而带来的图像模糊,并获得连续演化的清晰实验图像。

2 结果和分析

利用半环形汇聚激波管和高速纹影成像系统,我们分别得到了 $a = 1\text{mm}$ 、 2mm 、 4mm 三种不同初始振幅工况下柱状汇聚激波诱导的单模界面 RM 不稳定性演化过程,其中激波经过半环形管道时的马赫数为 1.21。图4给出了不同时刻实验段内激波作用初始振幅为 1mm 的 Air/SF_6 气柱界面后激波和界面的一些特征状态(定义激波运动到单模界面初始扰动的波峰(Crest)位置为时间零点 $t = 0$)。整个界面扰动发展和波系形成过程可以从以下四个阶段进行描述:

(I)入射柱状激波(Incident cylindrical shock, ICS)首先遇到初始单模界面(Initial single-mode interface, ISI)的波峰,产生一道向外运动的反射波(Outward-moving reflected shock, ORS)和一道向内运动的透射波(Inward-moving transmitted shock, ITS),波峰受到压缩并向内运动,在入射激波到达波谷(Trough)之前,扰动振幅将逐渐变小。

(II)透射激波向界面内部推进,在几何中心处产生透射激波聚焦(Transmitted shock focusing, TSF)并反射,反射波再次与变形的单模界面(Distorted single-mode interface, DSI)作用之前,界面主

要受到斜压涡量影响向内发展,伴随着振幅的增长。

(III)反射波再次作用变形界面,将产生二次反射和透射。由于激波从重气体向轻气体运动,因此二次反射波(Secondary reflected waves, SRW)为稀疏波,二次透射波(Secondary transmitted shock, STS)为激波。在这个过程中界面出现反相(phase inversion)趋势,扰动振幅再度减小。

(IV)界面反相后继续发展,内部波系来回反射并逐渐削弱,扰动不断增长,并最终演化出蘑菇状结构,两种气体也逐渐混合。当时间继续增长,流场将发展成为两种气体的湍流混合。

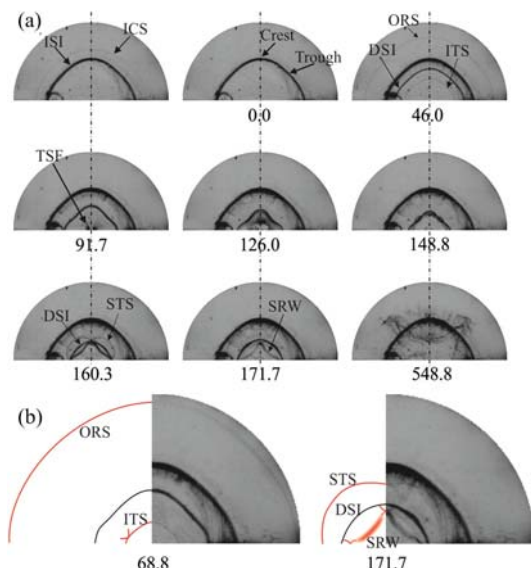


图 4 柱状汇聚激波冲击初始振幅 1mm 单模界面的演化过程。(a)界面变形和激波演化的纹影图。图片下方为时刻(单位为 μs);(b)一次和二次作用后的典型波系结构。ICS, 入射柱状激波; ISI, 初始单模界面; ORS, 向外运动的反射波; ITS, 向内运动的透射波; DSI, 变形的单模界面; TSF, 透射激波聚焦; STS, 二次透射波; SRW, 二次反射波。

Fig. 4 Complete evolution process of the single-mode interface with $a=1\text{mm}$ accelerated by the cylindrical converging shock. (a) Sequence of schlieren images showing the shock propagation and interface deformation at different times (unit: μs); (b) Typical shock patterns after the first and the second shock-interface interactions. ICS, incident cylindrical shock; ISI, initial single-mode interface; ORS, outward-moving reflected shock; ITS, inward-moving transmitted shock; DSI, distorted single-mode interface; TSF, transmitted shock focusing; STS, secondary transmitted shock; SRW, secondary reflected waves.

初始振幅越大,变形后的界面振幅也越大,激波穿过整个界面后,波峰逐渐演化成气泡,而波谷逐渐演化成尖钉,反相过程经历的时间就会变得越长。在第 IV 阶段,三种工况下界面最终都演化出蘑菇状结构。不同之处在于初始振幅越大,尖钉结构越细,发展的也越快。

图 6 给出了不同振幅单模界面与激波作用过程中波峰与波谷的位置随时间的变化。在初始时刻,界面的波峰先被压缩,而波谷位置保持不变,之后波峰和波谷都向汇聚中心运动。当激波和界面的二次

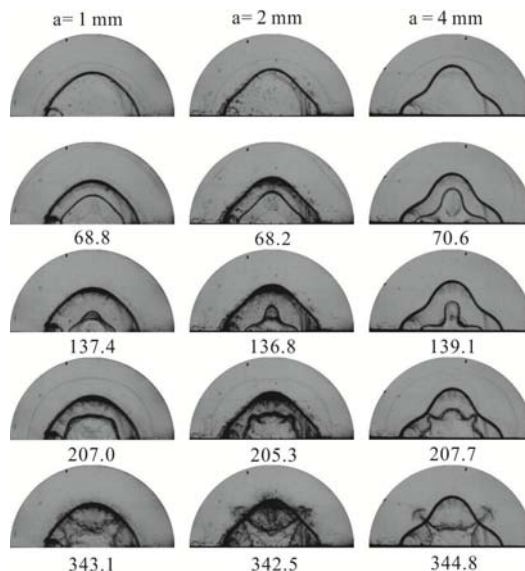


图 5 不同初始振幅 $a=1\text{mm}$, 2mm , 4mm 工况下界面变形与激波演化对比图。图片下方为时刻(单位: μs)
Fig. 5 Comparison of the interface deformation and shock propagation under initial amplitudes $a=1\text{mm}$, 2mm , 4mm at different times (unit: μs), respectively

图 5 给出了实验过程中激波与不同初始振幅单模界面作用过程的对比图。纵向排列分别为界面初始振幅 $a=1\text{mm}$, 2mm , 4mm 三种不同工况;横向排列采用相近时刻作对比。三种工况下界面和波系的演化都遵循上述四个阶段,扰动振幅的变化趋势也相似,但仍存在一定差别。从图 5 中可以看到,当激波作用界面后,随着初始振幅的增大,界面形变越大,波系也发生相应的变化。在第 II 阶段,与 $a=1\text{mm}$ 工况相比, $a=2\text{mm}$ 工况中的透射激波波后流场变得不均匀,出现明显的稀疏波区域,而 $a=4\text{mm}$ 工况下形成的透射激波演变成“三波点和马赫杆”结构。激波在中心处汇聚后反射,初始振幅越大,越早发生二次作用。在第 III 阶段,

作用发生之后,波谷瞬间反向运动,形成尖钉结构,从而与汇聚中心的距离逐渐增大;而波峰在激波作用之后先是向外跟随激波方向运动,之后转变为气泡向内收缩,在内部激波的来回作用下出现波动,最后与外部气体混合并不断发展。对比三种工况可以发现,三种界面的波峰和波谷随时间运动的趋势相同,但是发展速率却有区别。比如在第 II 阶段,初始振幅越大,波谷的运动速率越大,这是汇聚效应引起的。界面压缩后,由于汇聚激波随半径的减小而增大,波谷距离汇聚中心越近,汇聚激波的强度变得越强,波谷就会受到更大的冲击加速而发展。值得一提的是,汇聚效应使得界面波峰和波谷位置随时间的变化不再符合平面激波作用单模界面情况下的线性发展规律。在汇聚激波管中,激波强度会随激波的位置发生变化,流场中的压力分布也会因波系的演化而发生变化。因此,界面的发展也变得更复杂了。

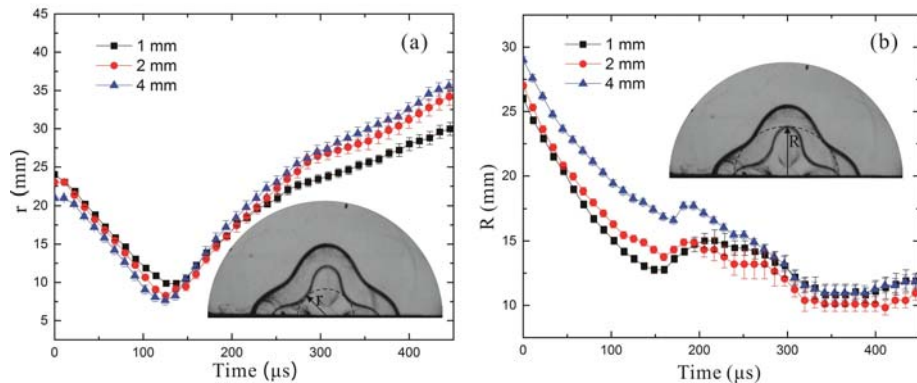


图6 三种不同初始振幅工况下界面(a)波峰及(b)波谷距汇聚中心的距离随时间的变化

R 为波峰距离汇聚中心的距离; r 为波谷距离汇聚中心的距离

Fig. 6 Variations of the distance from the trough (a) and the crest (b) of the interface to the focal point in three cases. R stands for the distance between the crest and focal point, and r for the distance between the trough and focal point

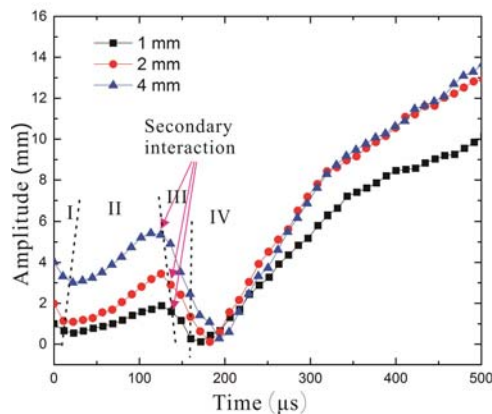


图7 柱状汇聚激波作用不同初始振幅单模界面情况下扰动振幅随时间的变化曲线

Fig. 7 The amplitude of perturbations changing with time after the shock-interface interactions for different initial amplitudes of the single-mode interfaces

图7给出了柱状汇聚激波与不同初始振幅单模界面相互作用过程中,扰动振幅随时间变化的曲线。从图中可明显分辨出界面扰动振幅的演化在四个阶段(I~IV)中呈现不同的规律。

(I) 由于4mm振幅较大的空间跨度,导致时间尺度较其他工况更长,振幅下降速度更为明显。这个阶段中界面受到压缩,不同工况间振幅也将发生变化。

(II) 激波离开界面之后,界面在流场中演化,此时由初始扰动引起的斜压涡量占主导,扰动振幅不断增长,由于振幅越大,斜压涡量越大,因而4mm工况也表现出更大的增长率。

(III) 二次作用使得反射波再次压缩变形界面,扰动振幅变小。第II阶段结束后,各工况的扰动振

幅差别变大。因此,4mm 工况中变形界面波峰波谷间更大的空间跨度产生了更大的几何变形,所用时间也更长,受到了更大程度的二次压缩。当振幅逐渐减小,界面反相也随之发生。该阶段中,由于 4mm 工况中扰动的波谷位置距离圆心更近,且该处的汇聚激波强度更高,因而界面在反相过程中受到更大的冲击加速,振幅也减小得更快。汇聚激波管的几何效应引起流场不均匀性,导致三个工况的振幅增长率也不断变化,这与平面激波情况有显著不同。

(IV) 扰动振幅在界面反相之后逐渐增长,且增长率呈现不断变化的趋势。在该阶段,扰动振幅的增长率要大于第 II 阶段的增长率,这是因为界面反相后形成了气泡和尖钉结构,尖钉的运动速度比较大。

3 结 论

本文实验研究了单模 Air/SF₆ 气体界面在柱状汇聚激波作用下的 RM 不稳定性发展演化规律。在自行设计和加工的半环形汇聚激波管中,利用纹影法结合高速摄影技术进行流场显示,得到了界面演化和激波发展的清晰实验图像。结果表明,汇聚激波与单模界面的作用过程可归纳为四个阶段,分别对应界面扰动振幅的不同变化趋势。对于不同初始振幅的工况,初始振幅越大,实验初期界面所受压缩的程度越大,产生的冲击加速效果越明显,涡量的积累越多;在与反射波的二次作用过程中,作用位置距离圆心更近,该处的激波强度更高,且大振幅工况伴随着更大的空间尺度,受到压缩的时间更长、程度更剧烈。当反相发生后,流场中产生了气泡和尖钉结构,此时冲击加速和斜压涡量都使振幅增大,且在较大初始振幅的工况下振幅增长更快。之后可以通过改变入射激波的马赫数,研究初始激波强度对汇聚 RM 不稳定性实验的影响。

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] Lindl J D, McCrory R L, Campbell E M. Progress toward ignition and burn propagation in inertial confinement fusion[J]. Physics Today, 1992, 45(9):32—40.
- [4] Arnett D. The role of mixing in astrophysics[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2000, 127(2):213.
- [5] Howard D, Sturtevant B. In vitro study of the mechanical effects of shock-wave lithotripsy[J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 1997, 23(7):1107—1122.
- [6] Yang J, Kubota T, Zukoski E E. Applications of shock-induced mixing to supersonic combustion[J]. AIAA Journal, 1993, 31(5):854—862.
- [7] Zabusky N J. Vortex paradigm for accelerated inhomogeneous flows: Visiometrics for the Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov environments[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31(1):495—536.
- [8] Brouillette M. The richtmyer-meshkov instability[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2002, 34(1):445—468.
- [9] Ranjan D, Oakley J, Bonazza R. Shock-bubble interactions[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2011, 43:117—140.
- [10] 施红辉,肖毅,杜凯等.用垂直激波管研究多层流体界面上的 Richtmyer-Meshkov 不稳定性[J].中国科学技术大学学报,2013,44:730—737(SHI Honghui, XIAO Yi, DU Kai, et al. Experimental study on a Richtmyer-Meshkov instability at multi-layered fluid interfaces with a vertical shock tube[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2013, 43:730—737(in Chinese))
- [11] 刘金宏,邹立勇,曹仁义等.绕射激波和反射激波作用下 N₂/SF₆ 界面 RM 不稳定性实验研究[J].力学学报,2014,46(3):475—479(LIU Jinhong, ZOU Liyong, CAO Renyi, et al. Experimental study on the Richtmyer-Meshkov instability at N₂/SF₆ flat interfaces by diffracted incident shock waves and reshock[J]. Chinese Journal of

- Theoretical and Applied Mechanics, 2014, 46:475—479(in Chinese))
- [12] 刘金宏, 谭多望, 柏劲松 等. 激波管实验研究非均匀流场 RM 不稳定性[J]. 实验力学, 2012, 27(2):160—164 (LIU Jinhong, TAN Duowang, BO Jinsong, et al. Experimental study of Richtmyer-Meshkov instability in nonuniform flow by shock tube[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(2):160—164(in Chinese))
- [13] Zhai Zhigang, Wang Minghu, Si Ting, et al. On the interaction of a planar shock with a light polygonal interface [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2014, 757:800—816.
- [14] Wang Minghu, Si Ting, Luo Xisheng. Generation of polygonal gas interfaces by soap film for Richtmyer-Meshkov instability study[J]. Experiments in Fluids, 2013, 54(1):1—9.
- [15] 罗喜胜, 翟志刚, 司廷 等. 激波诱导下的流体界面不稳定性实验研究[J]. 力学进展, 2014, 44:201407(LUO Xisheng, ZHAI Zhigang, SI Ting, et al. Experimental study on the interfacial instability induced by shock waves [J]. Advances in Mechanics, 2014, 44:201407(in Chinese))
- [16] Perry R W, Kantrowitz A. The production and stability of converging shock waves[J]. Journal of Applied Physics, 1951, 22(7):878—886.
- [17] Hsing W W, Hoffman N M. Measurement of feedthrough and instability growth in radiation-driven cylindrical implosions[J]. Physical review letters, 1997, 78(20):3876.
- [18] Apazidis N, Kjellander M, Tillmark N. High energy concentration by symmetric shock focusing [J]. Shock Waves, 2013, 23(4):361—368.
- [19] Kjellander M, Tillmark N, Apazidis N. Experimental determination of self-similarity constant for converging cylindrical shocks[J]. Physics of Fluids, 2011, 23(11):116103.
- [20] Kumar S, Hornung H G, Sturtevant B. Growth of shocked gaseous interfaces in a conical geometry[J]. Physics of Fluids (1994-present), 2003, 15(10):3194—3208.
- [21] Holder D A, Smith A V, Barton C J, et al. Mix experiments using a two-dimensional convergent shock-tube[J]. Laser and Particle Beams, 2003, 21(3):403—409.
- [22] Hosseini S H R, Takayama K. Experimental study of Richtmyer-Meshkov instability induced by cylindrical shock waves[J]. Physics of Fluids, 2005, 17(8):084101.
- [23] Hosseini S H R, Takayama K. Experimental study of toroidal shock wave focusing in a compact vertical annular diaphragmless shock tube[J]. Shock Waves, 2010, 20(1):1—7.
- [24] Fincke J R, Lanier N E, Batha S H, et al. Postponement of saturation of the Richtmyer-Meshkov instability in a convergent geometry[J]. Physical review letters, 2004, 93(11):115003.
- [25] Fincke J R, Lanier N E, Batha S H, et al. Effect of convergence on growth of the Richtmyer-Meshkov instability [J]. Laser and Particle Beams, 2005, 23(1):21—25.
- [26] Dimotakis P E, Samtaney R. Planar shock cylindrical focusing by a perfect-gas lens[J]. Physics of Fluids, 2006, 18(3):031705.
- [27] Biamino L, Jourdan G, Mariani C, et al. On the possibility of studying the converging Richtmyer-Meshkov instability in a conventional shock tube[J]. Experiments in Fluids, 2015, 56(2):1—5.
- [28] Biamino L, Mariani C, Jourdan G, et al. Planar shock focusing through perfect gas lens: First experimental demonstration[J]. Journal of Fluids Engineering, 2014, 136(9):091204.
- [29] Bond C, Hill D J, Meiron D I, et al. Shock focusing in a planar convergent geometry: experiment and simulation [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 641:297—333.
- [30] Zhai Zhigang, Liu Cangli, Qin Fenghua, et al. Generation of cylindrical converging shock waves based on shock dynamics theory[J]. Physics of Fluids, 2010, 22(4):041701.
- [31] Zhai Zhigang, Si Ting, Luo Xisheng, et al. Parametric study of cylindrical converging shock waves generated based on shock dynamics theory[J]. Physics of Fluids, 2012, 24(2):026101.
- [32] Si Ting, Zhai Zhigang, Luo Xisheng. Experimental study of Richtmyer-Meshkov instability in a cylindrical converging shock tube[J]. Laser and Particle Beams, 2014, 32(3):343—351.
- [33] Si Ting, Zhai Zhigang, Luo Xisheng, et al. Experimental study on a heavy-gas cylinder accelerated by cylindrical converging shock waves[J]. Shock Waves, 2014, 24(1):3—9.
- [34] Luo Xisheng, Ding Juchun, Wang Minghu, et al. A semi-annular shock tube for studying cylindrically converging

- Richtmyer-Meshkov instability[J]. *Physics of Fluids* (1994-present), 2015, 27(9):091702.
- [35] Luo Xisheng, Ding Juchun, Wang Minghu, et al. A semi-annular shock tube for studying cylindrically converging Richtmyer-Meshkov instability[J]. *Physics of Fluids*, 2015, 27(9):091702.
- [36] Zhai Zhigang, Si Ting, Luo Xisheng, et al. On the evolution of spherical gas interfaces accelerated by a planar shock wave[J]. *Physics of Fluids*, 2011, 23(8):084104.

Experimental Study of the Interaction of Single-Mode Gas Interface with Cylindrical Converging Shock Wave

LI Yang, DING Ju-chun, ZHAI Zhi-gang, SI Ting

(Advanced Propulsion Laboratory, Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Richtmyer-Meshkov (RM) instability of a single-mode Air/SF₆ gas interface interacting with cylindrical converging shock wave was experimentally studied in a self design and processing semi-annular converging shock tube. Different from previous annular shock tubes, this shock tube has a semicircle experimental section, which makes the semi annular pipe and experimental section are outward open and can refer to the traditional horizontal shock tube way to set the initial disturbance interface and observation system. In this work, single-mode initial disturbance interface is formed by using line constrained soap film method. Complete evolution process of interface subjected to action of cylindrical converging shock wave was obtained by high speed schlieren photography. In order to study the influence of initial amplitude on interface evolution, a single mode interface with three different initial amplitudes was generated, under three working conditions, the variations of interface displacement and disturbance amplitude along with time were obtained, respectively. Results show that RM instability produced by converging shock wave is very different from that of plane shock wave. The main reason lies in the convergence effect, including geometric convergence, the flow compression and interface phase inversion.

Keywords: cylindrical converging shock wave; richtmyer-meshkov instability; single-mode interface; high-speed schlieren photography