汇聚 Richtmyer-Meshkov 不稳定性实验研究进展

丁举春, 翟志刚, 司廷, 罗喜胜*

中国科学技术大学近代力学系, 合肥 230026

* 联系人, E-mail: xluo@ustc.edu.cn

2017-11-17 收稿, 2018-01-02 修回, 2018-01-17 接受, 2018-03-01 网络版发表

国家自然科学基金(11625211, 11621202)和科学挑战计划(TZ2016001)资助

摘要 Richtmyer-Meshkov (RM)不稳定性是流体力学的重要研究内容,无论在学术研究还是工程应用领域都有着重要的研究价值.近些年,学者们围绕平面激波诱导的RM不稳定性开展了大量实验、数值和理论研究,发现界面上的初始扰动在激波冲击之后依次经历线性增长、非线性增长和湍流混合3个发展阶段,压力扰动和斜压涡量是导致扰动发展的主要物理机制.然而,关于汇聚激波诱导的界面失稳现象却少有研究,汇聚空间中扰动发展的规律以及汇聚效应对扰动发展的影响尚不清楚.汇聚RM不稳定性研究要求在实验室条件下生成稳定的汇聚激波和形状可控的流体界面,对现有的实验方法提出了极大的挑战.本文简要回顾了近些年在两种不同结构的汇聚激波管设备中开展的汇聚RM不稳定性实验研究,重点讨论了几种典型汇聚效应对扰动发展的影响,并根据目前研究的局限性提出今后实验研究的3个重要方向:高马赫数激波诱导的界面失稳实验、三维界面的演化、扰动激波与无扰动或有扰动界面的相互作用.

关键词 RM 不稳定性, 激波, 界面, 汇聚效应, 斜压涡量

当一道激波冲击具有初始扰动的流体界面后,界面上的扰动依次呈现线性、非线性增长,并在演化的后期诱发湍流混合,这种复杂的界面失稳现象被称作Richtmyer-Meshkov (RM)^[1,2]不稳定性.在RM不稳定性流动中,当入射激波穿过具有初始扰动的界面后,界面扰动振幅首先被激波压缩到某一较小的值.同时,由于扰动的存在,激波附近的压力梯度与界面处的密度梯度一般不共线(斜压机制),从而在界面附近生成一层斜压涡.随后,在这些斜压涡的诱导下,界面形态不断发生演变,扰动振幅持续增长.在演化中后期,流场中出现较强的二次不稳定性(如Kelvin-Helmholtz不稳定性),使得界面附近生成许多小尺度涡结构,最终引发湍流混合.可以看出,RM不稳定性涉及激波动力学、涡动力学、流动转捩以及湍流混合等流体力学中的关键科学问题,开展相关

研究必然会有力地推动流体力学的发展.另外, RM不稳定性在惯性约束核聚变(inertial confinement fusion, ICF)^[3]、超燃冲压发动机^[4]、天体物理^[5]等领域有着广泛而重要的应用背景.例如,在ICF中,靶丸内层燃料和外层材料分界面上存在的初始小扰动在球形汇聚激波作用下出现不稳定的增长,内外层材料之间不断发生混合,导致内层燃料的纯度以及靶丸中心区域的温度远低于预期值,从而减小ICF的能量增益,情况严重时甚至会导致“点火”(聚变反应的启动)失败.

实验研究是开展RM不稳定性研究的一种重要手段,目前的实验方法主要有4种:激光惯性约束聚变^[3,6]、电磁套筒内爆^[7]、炸药驱动金属材料^[8]、激波加载流体界面^[2,9].相比前3种实验方法,在激波管中开展激波加载流体界面的实验研究具有周期短、初始

引用格式: 丁举春, 翟志刚, 司廷, 等. 汇聚 Richtmyer-Meshkov 不稳定性实验研究进展. 科学通报, 2018, 63: 618–628

Ding J C, Zhai Z G, Si T, et al. Progress in experiments of converging Richtmyer-Meshkov instability (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 618–628, doi: 10.1360/N972017-01211

条件可控、易获得高时空分辨率的实验结果等独特的优势。因此,已有的RM不稳定性实验研究工作多数是在激波管设备中开展的。

激波加载流体界面的实验研究主要分为3个方面:激波的产生、界面的形成以及流场的观测。已开展的RM不稳定性实验主要关注了平面激波与不同形状扰动界面(气泡^[10]、气柱^[11]、气帘^[12]、单/多模^[13,14]界面等)的相互作用,取得了显著的研究成果。然而,实际存在于自然界和重大工程应用中的界面不稳定性多是由汇聚激波冲击引起的(简称汇聚RM不稳定性)。相比平面RM不稳定性,汇聚激波作用下扰动的发展受更多因素的影响,如空间汇聚效应、流场非均匀性、反射激波的二次作用等,其界面演化呈现出与平面情况完全不同的规律。因此,开展汇聚RM不稳定性实验研究,掌握扰动发展的规律具有重要意义。

不同于平面激波的运动规律,汇聚激波波阵面上的初始扰动在激波汇聚的过程中会不断放大,易导致汇聚激波失稳。因此,在实验室条件下生成稳定的柱形或球形汇聚激波是汇聚RM不稳定性实验研究需解决的关键问题。目前,学者们主要通过设计特殊结构的激波管来生成汇聚激波,这些激波管从结构上可大体分为两类:同轴激波管^[15-19]和常规激波管^[20-23]。激波管的结构不仅直接影响着汇聚激波的生成,而且还间接决定着流体界面形成方法和流场观测手段的选择。因此,设计合理结构的汇聚激波管对RM不稳定性实验研究来说尤为重要。本文从已有的两类汇聚激波管出发,介绍各激波管中汇聚激波生成的原理以及相应的界面生成和流场观测技术,并根据已获得的实验结果简要讨论各激波管在开展汇聚RM不稳定性实验方面的优劣。最后,根据目前实验研究的局限性,从强汇聚激波、三维界面以及扰动激波诱导的界面失稳3方面对今后的汇聚RM不稳定性实验研究进行展望。

1 同轴汇聚激波管

1.1 水平同轴汇聚激波管

早在1951年Perry和Kantrowitz^[15]就提出了利用同轴结构的激波管来生成柱形汇聚激波。如图S1所示,该激波管主要包括一个柱形外管和一个锥形内核,为了获得对称性好的柱形激波,其外管和内核的对称轴需尽量保持重合,因此这类激波管被称为同

轴汇聚激波管。实验时,当高压段之间的隔膜破裂之后,生成一道向左传播的平面激波,该平面激波遇到锥形内核后,在其表面发生马赫反射,激波形状逐渐改变(趋向于和锥形内核的表面垂直)。当平面激波完全绕过锥形内核后,激波的传播方向发生90°转变,从四周向对称中心聚拢,从而在内核背面(实验段)形成一道柱状汇聚激波。需要注意的是,这套激波管中的锥形内核和外管之间必须安装支架,以达到固定内核的作用。

Perry和Kantrowitz^[15]在这套同轴激波管中成功生成了柱形汇聚激波,并发现受激波的强压缩之后中心区域的气体温度急剧上升以至于会出现短暂的发光现象。然而,实验结果表明,柱形激波在穿过支架时会不可避免地受到支架的干扰,且扰动在激波汇聚过程中不断放大,从而导致激波失稳,形成类似多边形结构的汇聚激波。汇聚激波失稳会严重影响中心区域高温高压热力学状态的获得,因此是国际上广泛关注的热点研究问题,瑞典的Apazidis等人^[24-26]在此方面开展了大量的研究工作。

1.2 竖直同轴无膜汇聚激波管

为了生成更理想的柱状汇聚激波,Hosseini等人^[17]对水平同轴激波管的结构进行优化和改进,设计了一套竖直同轴无膜汇聚激波管。如图S2所示,该激波管主要包括高压段、低压段、实验段和辅助段4个部分。实验时,先向辅助段内充气增压,使得橡皮膜鼓起将高压段隔离。然后,往高压段注入驱动气体,直到压力达到实验设定值时,停止充气。此时,将泄压阀门打开,辅助段的压力迅速下降,橡皮膜恢复到平衡位置,高、低压段几乎在瞬间连通,生成一道环形平面激波。当这道环形激波绕过实验段的拐角时,传播方向发生90°的转变,形成一道向实验段中心传播的柱形汇聚激波。相对于Perry和Kantrowitz^[15]的水平激波管,该套竖直激波管具有一个显著的优点,即其内管和外管之间不需要任何支撑,这在很大程度上避免了支架对激波带来的干扰。

随后,Hosseini和Takayama^[27]将肥皂膜界面生成技术应用到该汇聚激波管中,成功生成了包含不同种类气体(如氦气、氖气、空气、氩气等)的二维气柱,并利用双曝光全息干涉技术清晰地捕捉到柱形汇聚激波-气柱界面相互作用的过程。实验发现,在汇聚RM不稳定性中,入射激波穿过界面形成的透射激波

会不可避免地从小扰动中心反射回来,再次冲击正在演变的流体界面.在反射激波的二次作用之后,界面会快速进入湍流混合状态,且混合区宽度的增长率远高于平面情况.另外,汇聚中心的压力曲线表明,汇聚RM不稳定性的发展在很大程度上降低了中心区域的压力峰值.在这些实验中,气柱的中心和实验段(或柱形激波)的中心保持重合,因此柱形界面上只存在着随机小扰动,这种随机扰动很难从数学上进行准确的描述(初始条件不确定性),在一定程度上限制了实验结果的深入分析.

鉴于竖直无膜激波管可以生成较为稳定的柱形激波且在开展汇聚RM不稳定性实验方面有着不错的潜能, Si等人^[18]设计加工了一套结构类似的竖直无膜激波管,并对激波管的实验段进行改进,引入细针约束肥皂膜的界面生成技术在汇聚实验段中成功生成了正三角形、正四边形、正八边形 SF_6 气柱.这些形状可控的多边形气柱为汇聚RM不稳定性实验研究提供了较为理想的初始条件,关于多边形气柱的生成, Wang等人^[28,29]进行过详细的介绍. Si等人^[18]利用肥皂液示踪结合高速片光技术,捕捉到了3种多边形气柱在汇聚激波冲击下的演化过程.以正八边形气柱

为例(图1),受柱形激波冲击后,界面上的扰动振幅持续增长(第2~8帧),形成细长的尖钉结构(重流体侵入轻流体的部分称为尖钉,反之称为气泡).当反射激波再次作用扰动界面后(第9帧),界面发生反相(波峰和波谷交换位置),扰动振幅逐渐减小为零(第11帧),随后扰动快速发展,形成星状结构(第20帧).在图1所示的整个演化过程中,界面保持良好的对称性且具有清晰的轮廓,说明肥皂液滴示踪可较好地捕捉演化前期界面的大尺度结构.

随后, Lei等人^[30]为了消除细针对界面演化的影响,将平面激波管中发展的环约束肥皂膜界面生成技术^[11]引入该竖直汇聚激波管中,生成了具有正弦边界的 SF_6 气柱.如图S3所示,汇聚实验段上、下玻璃的内表面上嵌入单模形状的凸起(高度为0.2 mm),在 SF_6 气柱的生成过程中,气柱体积不断膨胀,当气柱边界遇到单模凸起之后受到约束,从而形成一道air/ SF_6 单模界面.同时,为了更清晰地捕捉气体界面的演化形态, Lei等人^[30]在 SF_6 气体中混入微米级的二氧化钛颗粒以充当示踪粒子,结合高速片光技术成功捕捉到了单模air/ SF_6 界面在柱形激波作用下的演化过程.图2的片光结果清晰再现了气柱内部马赫杆

图1 柱形激波与正八边形 SF_6 气柱相互作用^[18]

Figure 1 The interaction of a cylindrical shock with a octagonal SF_6 cylinder^[18]

图2 柱形激波与单模界面相互作用^[30]

Figure 2 Interaction of a cylindrical shock with a single-mode interface^[30]

形成、激波聚焦以及反射激波-界面相互作用等典型物理过程,说明相比于肥皂液,二氧化钛粒子示踪能更好地显示界面内部的流场.实验获得的扰动振幅随时间变化曲线初步反映了汇聚激波冲击下单模界面的发展规律:扰动振幅首先被激波压缩到某一较小的值,随后持续增加到一个极大值,在此之后振幅又开始逐渐减小,当反射激波冲击界面之后,扰动快速增长. Lei等人^[30]研究了不同波数的正弦界面在柱形激波作用下的演化过程,发现在反射激波作用之前,扰动发展几乎与波数无关,在反射激波作用之后

扰动发展与波数密切相关.

1.3 半环形水平汇聚激波管

虽然在改进后的竖直同轴激波管中更易实施先进的界面生成技术,生成形状可控的气体界面,但是其封闭的汇聚实验段仍然给界面生成过程带来巨大的困难,界面生成的成功率很低,在某种程度上影响着实验结果的可重复性.其次,适用于该激波管的高速片光技术难以捕捉波系的演化过程,因而易忽略与激波有关的流动现象.为了从根本上解决同轴激

波管的复杂结构给界面生成和流场观测带来诸多不便的难题, Luo等人^[19]设计加工了一套半环形同轴汇聚激波管, 其结构如图S4所示. 当高、低压段的隔膜破裂以后, 生成一道圆形平面激波. 当该平面激波经过入口段和半环形段时, 其波阵面分别转变成半圆形和半环形. 当半环形激波传播到实验段拐角处时, 其传播方向发生90°转变, 在实验段形成一道柱形内聚激波. 尽管半环形激波管的汇聚激波生成原理与前面几套同轴激波管类似, 但它兼具了水平激波管结构简单以及竖直激波管内核自支撑的优点, 且其独特的半环形结构使得我们可以利用传统的Z字形纹影系统对流场进行观测, 极大地降低了汇聚实验段流场观测的难度. 实验纹影结果显示激波在汇聚和发散过程中近乎保持着一个完美的半圆形.

根据实验段的半柱形结构, Ding等人^[31]设计了一套可移动的界面生成装置, 实验时, 只需在该装置中生成可控形状的气体界面, 然后将装置整体插入实验段中, 实现密封, 即可开展汇聚RM不稳定性实验. 这种在可移动界面装置中生成理想气体界面的方法在很大程度上降低了汇聚空间中的界面生成难度. Ding等人^[31]在该激波管中成功开展了汇聚激波冲击单模air/SF₆界面的实验, 首次得到激波传播和界面演化的详细过程(图3), 发现汇聚RM不稳定性中的界面扰动发展可分为4个不同的阶段(图4): 压缩阶段

(I)、加速增长阶段(II)、减速增长阶段(III)以及振幅衰减阶段(IV). 在不同阶段, 扰动发展受到不同物理因素的主导: 在阶段I, 初始气体界面受到激波压缩, 界面扰动急剧衰减; 在阶段II, Bell-Plesset (BP)^[32,33]效应有效促进扰动的增长; 在阶段III, 轻重界面减速引起的Rayleigh-Taylor (RT)^[34,35]稳定性极大地抑制了界面扰动的发展; 在阶段IV, 加强的RT稳定性使得扰动振幅快速衰减. 这些发现不仅揭示了汇聚激波诱导界面不稳定性的内在机理, 为相关理论和数值研究提供可靠的实验数据, 而且有助于理解惯性约束核聚变中流体力学界面不稳定性的复杂物理过程.

2 常规汇聚激波管

2.1 气体棱镜技术

另一种生成汇聚激波的方法是对常规平面激波管进行某种形式的改进. 气体透镜技术就是其中的一个典型代表. 当一道平面激波穿过不同气体的分界面时会发生折射, 生成一道反射激波(或稀疏波)和一道透射激波. Dimotakis和Samtaney^[36]设计了一种特殊形状的气体界面, 可使得平面激波穿过该界面后生成一道圆弧形的透射激波. 界面的形状依赖于入射激波的强度以及界面两侧的气体属性, 关于界面形状设计的具体过程及相关理论在文献[36]

图3 柱形激波与单模界面相互作用的纹影结果^[31]

Figure 3 Schlieren results showing the interaction of a cylindrical shock interacting with a single-mode interface^[31]

图4 (网络版彩色)振幅随时间的变化曲线^[31]

Figure 4 (Color online) Temporal variation of the perturbation amplitude^[31]

中有详细介绍。

为了验证气体棱镜技术的可行性, Biamino等人^[23]在常规水平激波管的末端连接一个V字形汇聚实验段, 并利用硝化纤维膜在汇聚段和水平激波管之间生成一个椭圆形的air/SF₆界面(图S5), 实验结果证明激波在穿过该气体界面之后成功生成了一道柱形透射激波。为了进一步开展界面不稳定性实验, Biamino等人^[37]在激波管实验段生成了air/SF₆/air的双层界面, 当平面激波经过第一道椭圆形的air/SF₆界面后, 生成一道柱形汇聚激波, 随后该柱形激波不断汇聚, 冲击下游的正弦SF₆/air界面, 诱导界面失稳。图5所示的纹影结果, 再现了激波和界面作用之后流场中波系和界面的演化过程, 发现在柱形激波的冲击之后, 界面发展依次经历压缩、反相、扰动快速增长3个阶段。由于硝化纤维膜对界面演化有很大的影响, 且纹影图像中界面的空间分辨率较低, 因此对该实验结果的分析仅限于定性讨论。

2.2 激波动力学方法

Zhai等人^[20~22]根据激波动力学理论设计特殊形状的转换段, 可将平面激波逐渐转化为柱形汇聚激波。相比于气体棱镜技术, 该方法获得的汇聚激波的初始形状更加完美, 且波后几乎没有杂波, 为汇聚RM不稳定性实验创造了一个较为理想的冲击条件^[22]。Si等人^[38]在该激波管中利用肥皂膜技术生成了SF₆气泡, 并成功开展了汇聚激波冲击SF₆气泡的实验研究, 利用高速纹影方法捕捉到了柱形激波-气泡

图5 柱形激波冲击SF₆/air单模界面^[37]

Figure 5 Interaction of a cylindrical shock with a single-mode SF₆/air interface^[37]

相互作用的详细过程, 如图6所示。实验结果表明, 受汇聚激波冲击后, SF₆气泡的演化过程总体上和平面情况类似, 如出现激波聚焦、气柱下游形成射流、旋涡卷起等典型流动现象, 但二者仍然存在着很大的差异。由于柱形激波在向内汇聚的过程中强度逐渐增高, 在SF₆内发生聚焦后可产生更高的局部压力, 从而在下游界面处形成一个更长的射流结构。另外, 激波穿过SF₆气柱之后生成的复杂波系在收缩的壁面上来回反射, 与气泡发生多次作用, 严重影响气泡的演化变形。

Si等人^[39]随后利用射流技术在该激波管实验段中生成了无膜SF₆气柱, 并在SF₆气体中掺入乙二醇示踪粒子, 利用高速片光技术捕捉到了无膜SF₆气柱受柱形激波冲击之后的演化过程, 如图7所示。在入射激波冲击之后, SF₆气柱受激波压缩变成椭圆形, 然后快速发展成弯月状, 并在下游界面形成一个尺度较小的射流结构, 最后界面演化成一对旋涡结构。虽然气柱的整体演化过程与平面情况差异不大, 但可以很明显地看出, 两个旋涡的下游边界相比平面情况更为尖锐, 这与汇聚激波后的非均匀速度场以及周向收缩效应密切相关。当反射激波再次作用正在演变的气柱界面后, 形成一对反向旋涡, 两对旋涡

图6 柱形激波与SF₆气泡相互作用^[38]Figure 6 Interaction of a cylindrical shock with a SF₆ bubble^[38] 图7 柱形激波与SF₆气柱相互作用^[39]Figure 7 A cylindrical shock interacting with a SF₆ cylinder^[39]

的相互诱导主导着后期界面的演化. Si等人^[39]认为在汇聚激波与流体界面相互作用的过程中激波强度和激波曲率均不断变化, 斜压涡量的生成过程相比平面情况更为复杂, 这是汇聚RM不稳定性中出现复杂物理现象的主要原因.

通过以上回顾可发现, 已有的实验研究多集中

于不稳定性前期的扰动增长, 关于后期的湍流混合却鲜有研究. 一个主要的原因是湍流场特性分析需要流动的速度场和密度场同时进行高分辨率的测量, 给现有的实验测量技术带来了极大的挑战. 近年来, 美国阿拉莫斯实验室的Balakumar等人^[40]率先采用粒子成像测速(particle image velocimetry, PIV)和平

面激光诱导荧光(planar laser induced fluorescence, PLIF)相结合的方法,在平面激波管中成功获得了激波冲击 SF_6 气帘后的湍流场特性,为RM湍流混合研究开辟了一条可行的路径.借助先进的测量技术,该团队开展了一系列实验研究,发现反射激波、初始激波强度以及界面形状等因素对RM湍流场的特性有重要影响^[41-43].然而,目前PIV/PLIF瞬时测量技术还没有被成功应用于汇聚RM不稳定性的实验研究中,关于汇聚空间中的湍流场特性以及汇聚效应对湍流混合区发展的影响还尚不清楚.今后,研究人员需要在汇聚激波诱导的湍流混合方面投入更多的精力.值得一提的是,近些年国内的研究团队在RM不稳定性方面也开展了大量工作,取得了不错的研究成果.Zou等人^[44,45]开展了平面激波冲击椭圆形气柱以及扰动激波与无扰动界面相互作用的实验研究,获得了许多可靠的实验数据.Wang等人^[46]开发了一套并行大涡模拟程序,对RM不稳定性后期的湍流混合进行了一系列数值模拟研究.Tian等人^[47]利用任意拉格朗日-欧拉算法研究了双层流体界面在激波冲击后的演化问题.在理论方面,Wang等人^[48,49]推导得到了汇聚空间中的多组扰动增长公式,对汇聚RM不稳定性理论模型的发展起到了推动作用.

3 结论与展望

汇聚RM不稳定性是惯性约束核聚变、武器内爆等重大工程应用中亟待解决的关键科学问题,开展相关实验研究具有重要实际意义.目前,学者们主要通过两类不同的汇聚激波管(同轴激波管和常规激波管)生成柱形汇聚激波,并在其中开展汇聚激波诱导的界面不稳定性实验研究.已有两类激波管的汇聚激波生成方式有着本质的不同,激波管结构差异很大,因此在开展汇聚RM不稳定性实验研究方面各有优劣.同轴激波管能够产生完整的柱形激波,获得对称性较好的界面和波系演化图像,但其实验段尺寸较小,从前期界面失稳到后期湍流混合的整个过程发生在非常短的时间尺度内,现有的流场观测手段难以捕捉流动演化的细节,从而易忽略掉汇聚情况下一些特有的流动现象.相比同轴激波管,常规激波管的实验段更为细长且结构简单,便于利用已有的流场测量技术获得详细的界面演化过程,但其楔形壁面上的边界层对界面演化的影响尚不清楚.

近些年,学者们通过不断优化同轴激波管和常

规激波管的结构设计,发展先进的界面生成技术和流场观测手段,成功获得了柱形激波与多边形、单模界面、三维极小曲面、气柱、气泡相互作用后的界面演化过程,发现汇聚过程中存在的BP效应、RT效应、可压缩性等极大地影响着界面扰动的发展,使得汇聚激波诱导下的扰动发展与平面情况有着很大的差异.虽然近些年在汇聚RM不稳定性实验研究方面取得了一些进展,但已有的实验研究仍存在很大的局限性,今后还需要在以下3个方面取得突破.

(1) 强激波实验.已有的激波管实验多是在弱激波条件下开展的,这与ICF、武器内爆等实际工程问题中的强激波诱导界面失稳现象有着很大的差异,随着激波强度的增加,波后的真实气体效应逐渐显现^[50],扰动发展呈现出与低马赫数情况下完全不同的规律^[51-53].当气体受到强激波压缩,温度高于某一临界值后,流场中会出现分解、电离等极端条件下的热力学现象,这些热力学过程与流体的动力学过程相互耦合,使得界面的演化发展变得极其复杂.因此,开展强汇聚激波诱导的RM不稳定性实验,研究极端条件下的扰动发展规律是今后一个重要的研究方向.

(2) 三维界面的演化.初始界面的形状(曲率)决定着流场中密度梯度的方向,从而间接影响界面附近斜压涡的分布,因此在RM不稳定性问题中,界面的演化形态极其依赖于初始界面的空间曲率.相对于二维界面,三维界面在高度方向具有额外的曲率,界面上沉积三维斜压涡量,扰动发展会变得更加复杂,初步的研究证明高度方向的曲率会抑制或促进不稳定性发展^[54-56].因此,实验研究汇聚激波与三维界面的相互作用,探索三维曲率效应对扰动发展的影响,并最终实现利用界面曲率来调控不稳定性发展的速率具有重大意义.

(3) 扰动激波诱导的RM不稳定性.已有的RM不稳定性实验多考虑一道理想的汇聚激波冲击具有初始扰动的流体界面.然而,在实际应用中,除了界面受到扰动之外,入射激波也常伴随有较强的初始扰动,扰动激波后的非均匀压力场严重影响界面的演化.特别地,对于汇聚激波,其波阵面上的初始扰动在激波汇聚过程中不断放大,从而导致波后的非均匀压力场会在更大程度上影响着界面的发展.可见,研究扰动汇聚激波与流体界面的相互作用,理解扰动发展的机理,对预测实际情况中的复杂界面不稳定性问题有重要指导意义.

参考文献

- 1 Richtmyer R D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. *Commun Pure Appl Math*, 1960, 13: 297–319
- 2 Meshkov E E. Instability of the interface of two gases accelerated by a shock wave. *Fluid Dyn*, 1969, 4: 101–104
- 3 Lindl J, Landen O, Edwards J, et al. Review of the national ignition campaign 2009–2012. *Phys Plasm*, 2014, 21: 020501
- 4 Yang J, Kubota T, Zukoski E E. Application of shock-induced mixing to supersonic combustion. *AIAA J*, 1993, 31: 854–862
- 5 Arnett W D, Bahcall J N, Kirshner R P, et al. Supernova 1987 A. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1989, 27: 629–700
- 6 Welser-Sherrill L, Haynes D A, Mancini R C, et al. Inference of ICF implosion core mix using experimental data and theoretical mix modeling. *High Energy Dens Phys*, 2009, 5: 249–257
- 7 Parker J. A primer on liner implosions with particular application to the Pegasus II capacitor bank. Technical Report, Pulsed Power for High Energy Density Physics. 1993
- 8 Lee E, Breithaupt D, McMillan C, et al. Motion of thin metal walls and the equation of state of detonation products. In: *Proceedings of 8th Symposium (International) on Detonation*. Albuquerque, 1985. 951–961
- 9 Brouillette M. The Richtmyer-Meshkov instability. *Annu Rev Fluid Mech*, 2002, 34: 445–468
- 10 Ranjan D, Oakley J, Bonazza R. Shock-bubble interactions. *Annu Rev Fluid Mech*, 2011, 43: 117–140
- 11 Wang X, Yang D, Wu J, et al. Interaction of a weak shock wave with a discontinuous heavy-gas cylinder. *Phys Fluids*, 2015, 27: 064104
- 12 Prestridge K, Rightley R M, Vorobieff P, et al. Simultaneous density field visualization and PIV of a shock-accelerated gas curtain. *Exp Fluids*, 2000, 29: 339–346
- 13 Jacobs J W, Krivets V V. Experiments on the late-time development of single-mode Richtmyer-Meshkov instability. *Phys Fluids*, 2005, 17: 034105
- 14 Jacobs J W, Krivets V V, Tsiklashvili V, et al. Experiments on the Richtmyer-Meshkov instability with an imposed, random initial perturbation. *Shock Waves*, 2013, 23: 407–413
- 15 Perry R W, Kantrowitz A. The production and stability of converging shock waves. *J Appl Phys*, 1951, 22: 878–886
- 16 Takayama K, Kleine H, Groenig H. An experimental investigation of the stability of converging cylindrical shock waves in air. *Exp Fluids*, 1987, 5: 315–322
- 17 Hosseini S H R, Ondera O, Takayama K. Characteristics of an annular vertical diaphragmless shock tube. *Shock Waves*, 2000, 10: 151–158
- 18 Si T, Long T, Zhai Z G, et al. Experimental investigation of cylindrical converging shock waves interacting with a polygonal heavy gas cylinder. *J Fluid Mech*, 2015, 784: 225–251
- 19 Luo X S, Ding J C, Wang M H, et al. A semi-annular shock tube for studying cylindrically converging Richtmyer-Meshkov instability. *Phys Fluids*, 2015, 27: 091702
- 20 Zhai Z G, Liu C L, Qin F H, et al. Generation of cylindrical converging shock waves based on shock dynamics theory. *Phys Fluids*, 2010, 22: 041701
- 21 Zhai Z G, Si T, Luo X S, et al. Parametric study on the cylindrical converging shock waves generated based on shock dynamics theory. *Phys Fluids*, 2012, 24: 026101
- 22 Luo X S, Si T, Yang J M, et al. A cylindrical converging shock tube for shock-interface studies. *Rev Sci Instrum*, 2014, 85: 015107
- 23 Biamino L, Mariani C, Jourdan G, et al. Planar shock focusing through perfect gas lens: First experimental demonstration. *J Fluids Eng*, 2014, 136: 091204
- 24 Apazidis N, Lesser M B. On generation and convergence of polygonal-shaped shock waves. *J Fluid Mech*, 1996, 309: 301–319
- 25 Apazidis N, Lesser M B, Tillmark N, et al. An experimental and theoretical study of converging polygonal shock waves. *Shock Waves*, 2002, 12: 39–58
- 26 Apazidis N, Kjellander M, Tillmark N. High energy concentration by symmetric shock focusing. *Shock Waves*, 2003, 23: 361–368
- 27 Hosseini S H R, Takayama K. Experimental study of Richtmyer-Meshkov instability induced by cylindrical shock waves. *Phys Fluids*, 2005, 17: 084101
- 28 Wang M H, Si T, Luo X S. Generation of polygonal gas interfaces by soap film for Richtmyer-Meshkov instability study. *Exp Fluids*, 2013, 54: 1427
- 29 Wang M H, Si T, Luo X S. Experimental study on the interaction of planar shock wave with polygonal helium cylinders. *Shock Waves*, 2015, 25: 347–355
- 30 Lei F, Ding J C, Si T. Experimental study on a sinusoidal air/SF₆ interface accelerated by a cylindrically converging shock. *J Fluid Mech*, 2017, 826: 819–829
- 31 Ding J C, Si T, Yang J M, et al. Measurement of a Richtmyer-Meshkov instability at an air-SF₆ interface in a semiannular shock tube. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 014501
- 32 Bell G I. Taylor instability on cylinders and spheres in the small amplitude approximation. Technical Report, Los Alamos Scientific Laboratory. 1951

- 33 Plesset M S. On the stability of fluid flows with spherical symmetry. *J Appl Phys*, 1954, 25: 96–98
- 34 Rayleigh L. Investigation of the character of the equilibrium of an incompressible heavy fluid of variable density. *Proc London Math Soc*, 1883, 14: 170–177
- 35 Taylor G. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. *Proc R Soc Lond A*, 1950, 201: 192–196
- 36 Dimotakis P E, Samtaney R. Planar shock cylindrical focusing by a perfect-gas lens. *Phys Fluids*, 2006, 18: 031705
- 37 Biamino L, Jourdan G, Mariani C, et al. On the possibility of studying the converging Richtmyer-Meshkov instability in a conventional shock tube. *Exp Fluids*, 2015, 56: 1–5
- 38 Si T, Zhai Z G, Luo X S. Experimental study of Richtmyer-Meshkov instability in a cylindrical converging shock tube. *Laser Part Beams*, 2014, 32: 343–351
- 39 Si T, Zhai Z G, Luo X S, et al. Experimental study on a heavy-gas cylinder accelerated by cylindrical converging shock waves. *Shock Waves*, 2014, 24: 3–9
- 40 Balakumar B J, Orlicz G C, Tomkins C D, et al. Simultaneous particle-image velocimetry-planar laser-induced fluorescence measurements of Richtmyer-Meshkov instability growth in a gas curtain with and without reshock. *Phys Fluids*, 2008, 20: 124103
- 41 Orlicz G C, Balakumar B J, Tomkins C D, et al. A Mach number study of the Richtmyer-Meshkov instability in a varicose, heavy-gas curtain. *Phys Fluids*, 2009, 21: 064102
- 42 Balasubramanian S, Orlicz G C, Prestidge K P, et al. Experimental study of initial condition dependence on Richtmyer-Meshkov instability in the presence of reshock. *Phys Fluids*, 2012, 24: 034103
- 43 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 Fluid Mech*, 2012, 696: 67–93
- 44 Zou L Y, Liao S F, Liu C L, et al. Aspect ratio effect on shock-accelerated elliptic gas cylinders. *Phys Fluids*, 2016, 28: 036101
- 45 Zou L Y, Liu J H, Liao S F, et al. Richtmyer-Meshkov instability of a flat interface subjected to a rippled shock wave. *Phys Rev E*, 2017, 95: 013107
- 46 Wang T, Bai J S, Li P, et al. Large-eddy simulations of the Richtmyer-Meshkov instability of rectangular interfaces accelerated by shock waves. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2010, 53: 905–914
- 47 Tian B L, Shen W D, Jiang S, et al. A global arbitrary Lagrangian-Eulerian method for stratified Richtmyer-Meshkov instability. *Comput Fluids*, 2011, 46: 113–121
- 48 Wang L F, Wu J F, Ye W H, et al. Weakly nonlinear incompressible Rayleigh-Taylor instability growth at cylindrically convergent interfaces. *Phys Plasm*, 2013, 20: 042708
- 49 Wang L F, Wu J F, Guo H Y, et al. Weakly nonlinear Bell-Plesset effects for a uniformly converging cylinder. *Phys Plasm*, 2015, 22: 082702
- 50 Liverts M, Apazidis N. Limiting temperatures of spherical shock wave implosion. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 014501
- 51 Fincke J R, Lanier N E, Batha S H, et al. Effect of convergence on growth of the Richtmyer-Meshkov instability. *Laser Part Beams*, 2005, 23: 21–25
- 52 Fincke J R, Lanier N E, Batha S H, et al. Postponement of saturation of the Richtmyer-Meshkov instability in a convergent geometry. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 115003
- 53 Lanier N E, Barnes C W, Batha S H, et al. Multimode seeded Richtmyer-Meshkov mixing in a convergent, compressible, miscible plasma system. *Phys Plasm*, 2003, 10: 1816–1821
- 54 Luo X S, Guan B, Zhai Z G, et al. Principal curvature effects on the early evolution of three-dimensional single-mode Richtmyer-Meshkov instabilities. *Phys Rev E*, 2016, 93: 023110
- 55 Luo X S, Guan B, Si T, et al. Richtmyer-Meshkov instability of a three-dimensional SF₆-air interface with a minimum-surface feature. *Phys Rev E*, 2016, 93: 013101
- 56 Guan B, Zhai Z G, Si T, et al. Manipulation of three-dimensional Richtmyer-Meshkov instability by initial interfacial principal curvatures. *Phys Fluids*, 2017, 29: 032106

补充材料

- 图 S1 水平同轴汇聚激波管结构图
 图 S2 竖直同轴无膜汇聚激波管
 图 S3 界面生成示意图
 图 S4 半环形汇聚激波管(a)和汇聚激波形成示意图(b)
 图 S5 柱形激波生成示意图

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “汇聚 Richtmyer-Meshkov 不稳定性实验研究进展”

Progress in experiments of converging Richtmyer-Meshkov instability

Juchun Ding, Zhigang Zhai, Ting Si & Xisheng Luo*

Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

* Corresponding author, E-mail: xluo@ustc.edu.cn

When a corrugated interface separating two fluids of different properties is subjected to an impulsive acceleration, such as a shock wave, perturbations initially presented on the interface will grow with time and finally develop into turbulent mixing. This type of hydrodynamic instability is generally referred to as Richtmyer-Meshkov (RM) instability. RM instability is a significant topic in fluid mechanics, and has become increasingly attractive in recent years due to its academic significance in vortex dynamics and compressive turbulence as well as important applications in the fields of inertial confinement fusion, supersonic combustion and supernova explosion. For example in inertial confinement fusion, the implosion of the spherically converging shock wave induces intensive mixing between the outer ablator and the inner fuel, and hence greatly decreases the fusion yield. Over the past decades, the RM instability induced by a planar shock wave has been intensively studied through experiments, simulations and theories. Previous studies show that the initial perturbation on the density inhomogeneity subjected to a planar shock wave experiences successively linear growth, nonlinear growth and turbulent mixing. The pressure disturbance and the baroclinic vorticity are found to be the main factors responsible for the perturbation development. However, in most realities, RM instability occurs in a convergent geometry, and the geometry convergence nature would significantly complicate the instability development. So far, the RM instability triggered by a converging shock has seldom been investigated, and the instability development pattern in convergent geometry as well as the influences of the convergence effects, such as the Bell-Plesset (BP) and Rayleigh-Taylor (RT) effects, on the instability development remains unclear. To perform a converging experiment, one has to overcome two crucial challenges in RM instability experiments: producing a stable converging shock wave and generating a well-controlled initial interface in laboratory conditions, and these are very difficult to realize using the current experimental methods. In this paper, we review the converging RM instability experiments in two types of shock tube facilities, i.e., the coaxial-structure converging shock tube and the conventional converging shock tube. Various interface formation techniques developed based on these shock tube test sections of different structures are also discussed. Special attention is paid to the influences of the typical convergence effects, including the BP effect, the RT effect and the compressibility, on the instability development. Finally, based on the existing studies, we propose the following three issues for future experimental study: (1) RM instability induced by high Mach number shock waves; (2) developments of three-dimensional interfaces subjected to an impulsive impact; (3) interaction of a rippled shock with an unperturbed or a perturbed density interface.

RM instability, shock wave, interface, convergence effect, baroclinic vorticity

doi: 10.1360/N972017-01211