广义Richtmyer-Meshkov不稳定性研究进展

邹立勇*, 吴强, 李欣竹

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, 绵阳 621900

*联系人, E-mail: liyong.zou@hotmail.com

收稿日期: 2020-02-03; 接受日期: 2020-03-11; 网络出版日期: 2020-05-20

国家自然科学基金重大研究计划重点项目(编号: 91952205)和科学挑战专题(编号: TZ2016001)资助

摘要 Richtmyer-Meshkov (RM)不稳定性广泛存在于学术界和工程应用的诸多领域, 具有重要的研究背景和意义. 过去的研究大多局限于均匀激波冲击初始扰动界面诱导的经典RM不稳定性情形. 近年来, 非均匀扰动激波冲击物质界面诱导的广义RM不稳定性方向, 受到了学术界的关注, 其实验研究和数值模拟等方面取得了许多进展. 本文回顾了广义RM不稳定性研究方法的发展过程, 总结介绍了三种实验方法和三套数值模拟程序, 对比展示了这些方法及程序在广义RM不稳定性研究方面获得的图像结果和深入分析, 具体包括平面和汇聚两种几何构型下, 界面演化的激波形状、激波强度、界面密度比等多种效应, 以及在演化机理和理论模型方面取得的进展. 针对目前研究的局限性, 本文提出了未来研究的重要方向: 广义RM演化晚期湍流混合与经典RM晚期的异同、极端条件下实验、先进诊断技术、理论计算和内在物理机制.

关键词 经典RM不稳定性, 广义RM不稳定性, 激波, 界面, 压力扰动

PACS: 47.54.De, 47.20.Ma, 47.40.-x

1 引言

1960年Richtmyer^[1]理论研究了均匀激波冲击小扰动正弦界面时, 诱发的正弦界面不稳定性发展过程, 提出界面演化的线性理论. 随后, Meshkov^[2]在激波管实验中验证了该线性理论. 由于他们二位的开创性工作, Richtmyer-Meshkov (RM)不稳定性由此得名. 伴随着涡量的产生和输运, 界面逐步演化出尖钉和气泡结构, 进一步会出现二次不稳定性及小尺度结构, 最后进入湍流混合阶段. 该问题在惯性约束聚变^[3,4]、天体物理^[5,6]、超声速燃烧^[7,8]等领域有着重要的应用背景.

近年来, 对于该问题已经开展了大量的研究, 取得了显著的进展^[9-12].

在关于RM不稳定性的研究中, 入射激波和初始界面是两个重要的要素, 分别提供压力梯度和密度梯度, 二者方向不一致时, 即会出现斜压涡, 引起界面的演化发展. 因此, 入射激波和初始界面的形状对于不稳定性发展过程来说相当重要. 在以往的RM不稳定性研究中, 绝大多数计算^[13-17]、实验^[18-21]和理论^[21,22]进展都集中在Richtmyer和Meshkov最初提出的研究范畴, 即均匀入射激波冲击扰动初始界面这一相对简单的传统情形(简称为经典RM不稳定性). 然而, 在自然界和惯

引用格式: 邹立勇, 吴强, 李欣竹. 广义Richtmyer-Meshkov不稳定性研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 104702

Zou L Y, Wu Q, Li X Z. Research progress of general Richtmyer-Meshkov instability (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 104702, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0024

性约束聚变^[23,24]等许多背景应用中, RM不稳定性往往是由非均匀扰动激波冲击界面引起的(简称为广义RM不稳定性). 相比于经典RM不稳定性, 广义RM不稳定性更加复杂(图1), 如入射激波非均匀非定常、入射波后压力场非均匀、初始界面存在无初扰和有初扰两种可能, 其界面发展过程与经典情形有很大的不同. 因此, 开展广义RM不稳定性研究, 认识其界面演化及混合规律具有重要意义.

扰动激波是诱导界面出现广义RM不稳定性的关键所在. Briscoe和Kovitz^[25]实验研究表明, 平面扰动激波的振幅在运动过程中会出现振荡衰减. 对弱激波情形, 振幅振荡衰减曲线的外包络线与时间的关系呈现 $t^{-3/2}$ 幂次率^[26]. 针对孤立正弦扰动激波, Bates^[27]获得了振幅随时间振荡衰减的显式理论解. Mostert等人^[28,29]采用几何激波动力学近似方法, 理论研究了平面及汇聚扰动激波演化过程, 特别是波阵面上三波点等奇点的形成机理. Liang等人^[30]实验研究了绕柱汇聚扰动激波动力学过程, 表明在向内汇聚过程中, 扰动激波的振幅逐渐减小, 激波强度则逐渐增加, Zou等人^[31]的计算进一步验证了这些实验结果. 从以上研究中可以看到, 扰动激波在平面和汇聚情形都会存在, 其动力学过程在时间和空间上是非均匀的. 由于这种非均匀特点, 将会导致广义RM不稳定性的研究难度相比于经典RM不稳定性更大.

为了开展广义RM不稳定性研究, 首先需要解决如何生成可重复可控的非均匀扰动激波. 目前, 实验方面, 学者们通过在平面或汇聚激波管中设置圆柱或正弦干扰, 已经建立了三种方法, 使得初始均匀入射激波转变为非均匀激波, 进而冲击界面后出现广义RM

图1 (网络版彩图) (a) 经典RM不稳定性; (b) 广义RM不稳定性

Figure 1 (Color online) (a) Classic RM instability; (b) general RM instability.

不稳定性现象. 计算方面, 通过改进和提高, 已在三套程序中实现了与实验相应的数值模拟, 对实验现象和结果进行了再现和补充. 本文从已有的竖式、水平和汇聚激波管装置出发, 介绍了广义RM不稳定性研究的实验原理, 以及相应的计算程序, 随后分为平面、汇聚两种构型, 阐述了当前的研究进展, 讨论了这些研究的优势和不足. 最后, 根据目前研究的局限性, 对今后的广义RM不稳定性研究进行了展望.

2 研究方法进展

实验方面, 目前已有三种方法生成非均匀的入射激波来冲击初始界面不稳定性. 图2为在竖式激波管中, 平面激波由上向下运动, 经过一个刚体圆柱绕射后, 入射激波波阵面变成扰动激波^[32]. 初始界面形成技术采用与Jacobs团队研究^[33,34]类似的方法, 轻气体(N_2)和重气体(SF_6)分别从上部 and 下部缓慢充入激波管中, 这两个反向流动的气流在狭缝高度位置相遇后, 从激波管两侧相对的狭缝中流出, 从而形成初始平面气

图2 (网络版彩图)绕柱非均匀激波生成技术^[32]

Figure 2 (Color online) Technique of creating the non-uniform shock by diffracting an initially planar shock over a rigid cylinder [32].

体界面.

图3为在水平激波管中, 通过设置双界面方法, 来实现正弦激波冲击初始平界面不稳定性^[35]. 界面的厚度约为 $1\ \mu\text{m}$, 可由硝化纤维薄膜技术来制备^[36,37]. 初始平面入射激波IS从左向右运动(图3(a)), 经过He和 N_2 之间的正弦接触面CI(第一道界面)后, 入射激波转变为正弦形反射激波RS和透射激波TS(图3(b)), 当透射激波TS冲击下游的平面界面PI(第二道界面)时, 即为正弦扰动激波冲击平面界面RM不稳定性.

图4为在汇聚激波管中开展的扰动汇聚激波冲击界面实验^[30]. 初始气体界面由肥皂泡技术制成, 初始均匀汇聚激波由外向内运动^[38,39], 在经过刚体圆柱绕射后, 转变成非均匀汇聚扰动激波, 随后冲击内部的均匀气体界面, 即可实现扰动汇聚激波冲击界面实验.

计算方面, 目前有三套程序针对上述三类实验进行了数值模拟. 第一套程序^[40,41]求解二维可压缩Euler/Navier Stokes方程, 在笛卡儿坐标系上数值离散, 采用二阶无分裂Godunov方法^[42], 用level-set函数表示复杂

图3 (网络版彩图)正弦非均匀激波生成技术^[35]. (a) 初始状态; (b) 入射激波(IS)完全通过接触面的时刻

Figure 3 (Color online) Technique of creating the sinusoidal non-uniform shock [35]. (a) The initial state; (b) the time moment when the incident shock (IS) completely passes across the contact interface.

图4 (网络版彩图)汇聚绕柱非均匀激波生成技术^[30]

Figure 4 (Color online) Technique of creating the non-uniform convergent shock by diffracting over a rigid cylinder [30].

固体边界. 通过多步算法实现从物理流体区域到虚拟流体区域的插值, 利用自适应网格技术提高计算精度并维持合适的计算量. 数值格式在Chombo框架下执行, 结合浸没边界法对方程进行求解. 这套程序已用于计算平面^[41,43](图2)、汇聚^[31,44,45](图4)两种情形的广义RM不稳定性. 第二个程序^[46,47]求解可压缩多组分Euler方程, 激波和界面捕捉算法被用来追踪激波、接触面、界面等密度间断面. 二维直角坐标下, 原始变量用五阶WENO格式在特征空间进行重构, 单元边界数值通量利用HLLC近似黎曼求解器进行计算, 三阶TVD龙格-库塔格式用于时间推进. 针对图3所示的平面正弦扰动激波冲击平面界面不稳定性, 这套程序已进行了计算研究^[35,48]. 第三个程序基于有限体积法进行计算, 时间和空间均为二阶精度, 配合MUSCL-Hancock格式求解Euler方程^[49,50]. 该程序采用非结构自适应四边形网格, 对激波、膨胀波、界面等大密度梯度区域进行局部加密, 从而能够在合理的计算资源下, 较好地捕捉流场中的波系转变和间断面. 针对图2所示的绕柱扰动激波冲击界面实验, 这套程序进行了数值模拟^[51].

对比这三套计算程序, 第一套程序基于结构网格离散, 采用浸没边界法处理复杂边界, 可以计算绕刚体圆柱扰动激波的产生过程, 采用自适应网格加密和高阶插值, 因此可在节省计算量的同时保持高分辨率, 缺点在于自适应网格技术使程序发展及并行化过程变得复杂, 另外程序有些数值耗散. 第二套程序采用高阶WENO格式, 计算精度高, 数值耗散小, 通过进一步开发后可计算晚期湍流混合过程, 缺点在于不能用于非规则计算域, 不能计算绕柱扰动激波的产生过程, 且没有自适应网格加密功能. 第三套程序是基于非结构自适应网格, 具有时空二阶精度, 优点在于易处理复杂边界, 程序鲁棒性好, 缺点是数值耗散大.

3 研究内容

3.1 平面扰动激波诱导的广义RM不稳定性

在研究经典RM不稳定性^[1]30多年之后, 出现了关于广义RM不稳定性的报道. 1996年, Ishizaki等人^[52]计算研究了平面正弦激波加载平界面诱导的RM不稳定性过程, 正弦激波由一个正弦形活塞运动产生, 发现界面扰动增长率与激波冲击界面时刻的相位有关. 随后,

Ishizaki等人^[24,53]针对激光内爆过程,研究了扰动激波及界面随时间的变化规律,获得了扰动激波及烧蚀界面振幅的近似公式. Kane等人^[54]在Be材料激波管中,开展了三层靶丸激光实验,研究了扰动激波与界面的相互作用,实验和计算结果均表明,界面演化的相位和振幅主要由入射激波的速度振荡来决定.

2014年, Liu等人^[55]在气体激波管中,开展了绕柱入射激波冲击平面界面演化实验,发现入射激波作用下界面宽度增长缓慢,而反射激波再冲击后,局部扰动会产生大尺寸的尖钉和气泡结构,来自尾部固壁的反射稀疏波会再次加剧湍流混合区增长. 随后, Zou等人^[32,56]利用纹影和Mie散射测试技术,开展了三种不同圆柱-界面无量纲距离(η)情形的实验,纹影图像显示入射激波被两个三波点分为三段(平面激波、马赫杆1、马赫杆2),图5所示的Mie散射图像表明,界面演化结构整体呈现为“^”形,两侧为界面台阶(虚线圆圈区域),中间为孔洞结构(实线圆圈区域),这可由入射扰动激波波后压力的非均匀分布来解释. 对于三种不同的圆柱-界面距离,无量纲时间-界面振幅及孔洞贯穿深度曲线都可实现良好的归一化. 由于广义RM不稳定性尚无理论模型,通过将激波冲击界面时刻扰动激波的波长和振幅等同于经典RM不稳定性中激波冲击界面时刻扰动界面的波长和振幅,然后利用经典Richtmyer理论^[1]对其增长率进行预测. 可以发现,这种广义RM不稳定性增长率实验值显著小于经典Richtmyer理论值. 针对这个实验, Al-Marouf等人^[43]采

用前述第一套程序开展了相应的数值模拟,采用尖锐初始界面时,二者入射激波形状吻合很好,界面振幅形状定性类似,定量比较发现计算振幅值仅为实验值的1/2左右. 进一步深入研究发现,采用扩散初始界面后^[41],无论定性还是定量,计算与实验振幅值都吻合得很好. 值得一提的是,美国利弗莫尔国家实验室Zhou^[57]在其综述文章中,以两页篇幅对Zou等人^[32]的实验工作进行了详细介绍,肯定了其中的研究思路及实验结果.

借鉴刘金宏等人^[55]和Zou等人^[32]的实验方法, Zhai等人^[51]拓展研究了这种广义RM不稳定性. 通过设置多个刚体圆柱,调整相邻圆柱的间距,开展了系列实验(图6),讨论了平面激波IS绕射一个或多个圆柱后的波系,包括马赫杆1(MS1)、马赫杆2(MS2)、透射激波(TIS)和向后反射激波(BRS)等,着重分析了圆柱间距对于激波稳定性的影响,获得了5种情形下界面演化模式及振幅增长率,表明多个刚体圆柱之间的激波-激波相互作用对于界面演化有重要的影响,提出了一个修正理论模型,较好地预测了多圆柱情形下界面扰动的增长率. 采用前述第三套程序,他们进行了相应计算,网格收敛性测试表明,初始网格间距为0.2 mm情况下,流场中压力分布曲线达到收敛,此时最大密度梯度区域的网格间距为0.025 mm. 图6计算结果显示,无论是波系还是界面演化形态,计算与实验结果都吻合得不错.

前面的研究工作中,初始界面两侧都是相同的气

图5 (网络版彩图)绕柱扰动激波冲击平面界面演化像^[32]. (a) $\eta=2.0$; (b) $\eta=3.3$; (c) $\eta=4.0$

Figure 5 (Color online) Image sequences of the flat interface subjected to the rippled shock created by diffracting over a rigid cylinder ^[32]. (a) $\eta=2.0$; (b) $\eta=3.3$; (c) $\eta=4.0$.

图6 (网络版彩图)绕双柱扰动激波冲击平界面演化图像^[51]. (a) 实验结果; (b) 计算结果

Figure 6 (Color online) Image sequences of the flat interface subjected to the rippled shock created by diffracting over two rigid cylinders [51]. (a) Experimental results; (b) computational results.

体对 air/SF_6 , 且入射激波马赫数均为1.2左右. 进一步, Liao等人^[58,59]实验研究了这种广义不稳定性的Atwood数($At=(\rho_2-\rho_1)/(\rho_2+\rho_1)$)效应和激波强度(Ma)效应(图7), 实验参数范围为 $0.22 \leq At \leq 0.68$ 及 $1.2 \leq Ma \leq 1.8$. 从图7中可以看到, 随着Atwood数和马赫数的增加, 除了中间孔洞及两侧台阶结构之外, 界面上还可以发现明显的反向涡对, 这是由于高马赫数、高密度比情形下斜压涡效应更强导致的. 定量地, 随着密度比的增加, 界面振幅增长率逐渐减小, 这一点与经典RM不稳定性的变化规律相反, 利用斜激波冲击均匀界面对这个现象进行了定性解释, 分析原因是由于激波冲击界面诱导的阶跃速度主导了界面振幅增长. 对于弱激波情形, 无论密度比如何, 实验振幅增长曲线可实现较好的归一化. 对于强激波情形, 界面演化后期出现了非线性效应.

绕柱激波诱导的广义RM不稳定性, 入射波系相当复杂, 难于进行严格的理论分析, 以及与经典RM的理论模型进行对比. 借鉴Richtmyer和Meshkov当初的研究思路^[1,2], Zhang等人^[35,48]采用前述第二套程序, 计算

图7 (网络版彩图) $Ma=1.8$ 情形下绕柱激波冲击平界面演化像^[58]: Atwood数效应. (a) $At=0.22$; (b) $At=0.50$; (c) $At=0.68$

Figure 7 (Color online) Image sequences showing the evolutions of the shocked interfaces at $Ma=1.8$ [58]: Atwood number effect. (a) $At=0.22$; (b) $At=0.50$; (c) $At=0.68$.

研究了正弦扰动激波冲击平界面问题. 图8和9分别为正弦激波冲击界面的相位效应图像和激波马赫数(Ma)效应图像, 其中CI代表变形后的接触面, PI表示变形后的平界面, BP和MP分别表示变形后平界面的边界点和中点. 结果表明, 单独正弦激波运动过程中的振幅变化曲线与Bates解析解^[27]符合很好, 界面演化增长率与正弦激波接触界面时刻的相位密切相关, 可以用脉冲速度振荡机制和连续压力振荡机制来解释. 在不同的相位, 界面演化的激波强度效应表现出不同的特点. 在入射激波振幅第一次为零的相位1, 随着激波强度的增加, 脉冲速度振荡机制相比连续压力振荡机制起到越来越重要的作用. 在入射激波振幅第二次为零的相位3, 在文中所研究的激波强度参数范围内, 脉冲速度

图8 (网络版彩图)正弦扰动激波冲击平面界面演化像^[35]: 相位效应. (a) 相位1; (b) 相位2; (c) 相位3; (d) 相位4

Figure 8 (Color online) Image sequences of the planar interface impacted by sinusoidal shock [35]: phase effect. (a) Phase 1; (b) phase 2; (c) phase 3; (d) phase 4.

图9 (网络版彩图)正弦扰动激波冲击平面界面演化像^[35]: 激波强度效应. (a) $Ma=1.10$; (b) $Ma=1.22$; (c) $Ma=1.30$; (d) $Ma=1.50$

Figure 9 (Color online) Image sequences of the planar interface impacted by sinusoidal shock [35]: shock strength effect. (a) $Ma=1.10$; (b) $Ma=1.22$; (c) $Ma=1.30$; (d) $Ma=1.50$.

振荡机制对整个不稳定性发展的贡献所占百分比保持为常数. 在Ishizaki等人^[52]提出的模型基础上, 发展得到了一个描述广义RM不稳定性脉冲速度振荡机制的经验公式. 相比经典RM不稳定性而言, 这里激波强度对于不稳定性发展过程有更重要的影响.

3.2 汇聚扰动激波诱导的广义RM不稳定性

许多实际工程应用的界面不稳定性发生在汇聚情形. 2017年Liang等人^[30]研究了汇聚扰动激波诱导均匀界面RM不稳定性, 系列实验在柱形汇聚激波管中开展, 入射激波马赫数为1.35, 初始界面两侧气体分别为air和 SF_6 , 扰动激波由初始均匀汇聚激波绕射刚体圆柱后形成, 重点研究了多个刚体圆柱之间波系的相互干扰, 以及相邻圆柱间距对于不稳定性发展过程的影响. 图10中纹影实验图像表明, 随着激波向内汇聚, 柱形扰动激波的强度单调增加, 激波振幅快速减小, 激波振幅与半径的比值逐渐增加. 在绕射汇聚激波冲击界面后, 由于界面内侧激波-激波碰撞后引起的压力升高, 导致界面上出现小凸起结构. 凸起结构的数量取决于刚体

图10 绕柱汇聚非均匀激波冲击界面演化实验图像^[30]

Figure 10 Experimental images of the uniform interface subjected to the perturbed convergent shock created by diffracting over rigid cylinders [30].

圆柱的数量. 随着圆柱数量的增加, 凸起结构变得更不明显, 这可归因于界面内复杂波系的相互作用. 随着圆柱-界面初始距离的增加, 在凸起结构出现之前, 界面上可以看到一个孔洞结构. 在中心反射激波作用界面之前, 由于Rayleigh-Taylor稳定性效应, 可以发现界面振幅有所减小. 类似于Zou等人^[32]平面情形的处理方式, 通过将汇聚激波冲击界面时刻激波扰动的波长和振幅等同于经典RM不稳定性中激波冲击界面时刻初扰界面的波长和振幅, 应用Richtmyer线性模型并考虑Bell-Plesset效应, 可以理论计算得到线性增长率, 发现理论值是实验值的3倍左右, 这与平面情形的实验结果^[32]是一致的. 用扰动激波刚好穿越界面后引起的界面振幅代入冲击模型, 可以实现理论和实验值的基本符合. 此外, 提出了一个考虑Rayleigh-Taylor效应的理论模型, 较好地预测了振幅增长的非线性阶段.

随后, 针对上述实验, Zou等人^[31,44,45]利用前述第一套程序, 进一步计算研究了该问题的激波强度效应^[44]和Atwood数效应^[31,45](图11), Atwood数的范围为

$-0.18 \sim 0.67$. 网格收敛性检验表明, 在加密系数为 $r=(2, 4, 4, 4)$ 的情况下, 计算得到的振幅值实现了良好收敛, 同时又可维持整体适中的计算量. 计算结果显示, 在柱面汇聚情形下, 界面演化总体上呈现为凸起结构和两侧的界面台阶, 这可归因于入射扰动激波波后压力的非均匀性. 随着密度比的减小, 凸起结构变得更明显. 定量地, 界面发展首先经历一个短暂的快速增长阶段, 然后进入线性阶段. 4种不同Atwood数情形的界面演化振幅可以实现较好的归一化, 这暗示界面增长率与Atwood数无关. 通过在Richtmyer线性理论中去掉Atwood数项, 并考虑汇聚效应, 提出了修正的振幅增长率公式:

$$\dot{a} = a_0 \Delta v (2\pi/\lambda_0 + 1/R). \quad (1)$$

结果表明, 该公式不仅良好地预测了文中计算得到的全部4组结果, 以往实验汇聚情形的另外两组结果^[28], 而且在假定半径 R 趋于无穷大的情况下, 还准确预测了平面情形的3组实验结果^[22]. 最后, 影响界面演

图11 (网络版彩图)绕柱汇聚非均匀激波冲击界面演化计算图像^[31]: Atwood数效应

Figure 11 (Color online) Numerical images of uniform interface subjected to the perturbed convergent shock created by diffracting over a rigid cylinder ^[31]: Atwood number effect.

化增长率的物理机制被解耦成为三部分: 脉冲振荡机制、连续振荡机制和几何汇聚机制. 其中脉冲振荡机制和几何汇聚机制促进界面增长, 而连续振荡机制则抑制界面的增长. 随着Atwood数减小, 脉冲振荡机制起到了越来越重要的作用, 表明脉冲振荡机制主导着汇聚广义RM不稳定性演化的线性阶段.

4 总结与展望

广义RM不稳定性在惯性约束聚变、武器内爆等重要工程应用中有明确的需求背景, 其演化晚期会出现湍流混合, 亦与可压缩湍流等重要的基础学术问题密切相关. 在当前的RM不稳定性研究方向, 绝大部分工作都集中在Richtmyer和Meshkov所建立的经典研究框架内, 即均匀的入射激波冲击非均匀的初始界面. 事实上, 物质界面在非均匀激波的诱导作用下, 也会出现界面演化, 即广义RM不稳定性现象. 关于非均匀激波运行动力学过程, 平面扰动激波的振幅会出现振荡衰减. 弱激波情形下, 振幅振荡衰减曲线的包络线随时间呈 $t^{-3/2}$ 幂次率关系. 汇聚扰动激波在向内聚心运动过程中, 伴随着激波强度的增加, 激波振幅会逐渐减小. 无论平面还是汇聚情形, 扰动激波动力学过程都是时空非均匀的, 这使得研究扰动激波诱导的广义RM不稳定性难度较大.

针对广义RM不稳定性问题, 过去20多年来, 学者们取得了一些重要进展. 在平面和汇聚两种几何构型下, 建立了三种生成扰动激波和均匀界面的实验方法, 结合纹影、Mie散射等技术, 获得了清晰的实验图像, 发现了界面孔洞、台阶等经典RM不稳定性中从未见过的流场新结构, 从入射激波后压力分布的角度, 对这些新结构给予了合理解释. 针对入射激波的强度和波形、复杂入射波系间的相互作用、界面两侧流体密度比等因素, 进行了深入研究, 发现了一些新规律, 如界面冲击初始段没有激波压缩界面过程, 线性段振幅增长率随Atwood数增加而减小等, 这些与经典RM不稳定性中的已有认识完全相反. 针对这些实验中所发现的现象和规律, 利用三套各有优缺点的数值程序进行了计算研究, 验证了实验中所发现的孔洞和台阶现象, 以及Atwood数效应等规律, 在实验和计算工作的基础上, 提出了新的线性段演化模型, 较好地预测了计算得到的界面演化增长率, 以及汇聚及平面实验中测得的

增长率. 该模型是基于目前结果得到的半经验模型, 尚有待于将来严格的理论解来进一步验证.

上述研究进展说明, 广义RM不稳定性演化过程从流场现象, 到物理规律, 再到内在的主导机制, 都与经典RM不稳定性有明显区别, 预期未来将会有广阔的发展空间. 虽然近些年来, 在这个方向取得了一些进展, 但已有的工作还存在诸多局限, 未来需要重点发展以下4个研究方向.

(1) 广义RM演化晚期湍流混合与经典RM晚期混合的异同. 现有进展已表明, 广义RM和经典RM在演化早期阶段有显著区别, 那么在晚期的湍流混合阶段, 二者相比又有何异同? 目前这个问题还是空白. 由于湍流混合无论在学术上还是工程上, 都具有重大意义, 所以亟需加以研究. 经典RM不稳定性诱导的湍流混合已有许多结果, 通过设计更高Atwood数、更强激波马赫数和反射激波二次冲击等情形, 来研究扰动激波诱导广义RM的晚期湍流混合问题, 具体包括: 混合转换在什么临界参数条件或区域内会发生? 转换后湍流混合的特性如何? 获得雷诺应力、湍动能、功率谱密度等湍流统计量数据, 从而定量描述和认识广义RM不稳定性诱导的湍流混合过程, 并与经典RM诱导的湍流混合结果进行定量对比, 具体分析这两者的异同.

(2) 极端条件下实验. 诸多应用背景中, 广义RM不稳定性问题都发生在极端条件下, 比如压力达到100 GPa, 温度达到10000 K以上. 因此, 从工程和学术的角度出发, 都有必要利用诸如大尺寸汇聚激波管、爆轰、磁驱或高能激光等强加载手段, 在实验中实现类似的极端条件, 开展包括气体-气体界面或固体-气体界面不稳定性实验, 进而获得高能量密度条件下的实验数据. 在这些不稳定性物理问题中, 将可能涉及非平衡效应、材料弹塑性和强度效应、化学反应、电离效应、相变、等离子体状态, 以及很宽参数范围效应(包括雷诺数、马赫数、Atwood数、Schmidt数)等, 会使问题变得非常复杂, 预计将与低能量密度条件下的常规实验现象和规律存在显著的差别.

(3) 先进诊断技术. 一方面, 现有的常规参数条件下广义RM不稳定性实验, 测试还局限于纹影和Mie散射技术, 需要进一步利用PIV和PLIF技术, 测量界面演化速度场、浓度场和湍流混合场. 另一方面, 在上述极端条件实验中, 常用的可见光测试技术, 将难以获得有效的实验图像, 需要发展具有穿透能力的先进测试技

术, 如拉曼光谱技术, 以及基于三代、四代光源的多种诊断技术. 高亮度X射线源和相关诊断技术的发展一旦取得突破, 将有可能显著改变高能量密度RM不稳定性实验及数据获取能力.

(4) 理论计算和内在物理机制. 针对广义RM不稳定性的理论和计算, 还处于起步阶段. 理论上, 需要推导严格的界面演化线性和非线性理论, 探索晚期湍流混合阶段理论. 同时, 也需要发挥直接数值模拟、大

涡模拟、雷诺平均等数值模拟技术的优势, 开展大规模计算获得丰富的全流场数据, 其中雷诺平均模拟计算量最小, 对于研究极端条件下的不稳定性问题具有优势, 但不能获得一些湍流场细节. 通过将计算结果与实验和理论结果进行对比和验证, 将可以深入认识其中的脉冲速度振荡、连续压力振荡、斜压涡等物理机制, 加深对于这一问题的规律性认识. 进一步, 计算结果还可以为实验设计提供重要的指导和参考.

致谢 感谢中国科学技术大学罗喜胜教授对本文工作提供的建议和帮助.

参考文献

- 1 Richtmyer R D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. *Comm 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*, 1972, 4: 101–104
- 3 Lindl J, Landen O, Edwards J, et al. Review of the National Ignition Campaign 2009–2012. *Phys Plasmas*, 2014, 21: 020501
- 4 Aglitskiy Y, Velikovich A L, Karasik M, et al. Basic hydrodynamics of Richtmyer-Meshkov-type growth and oscillations in the inertial confinement fusion-relevant conditions. *Proc R Soc A*, 2010, 368: 1739–1768
- 5 Shimoda J, Inoue T, Ohira Y, et al. On cosmic-ray production efficiency at supernova remnant shocks propagating into realistic diffuse interstellar medium. *Astrophys J*, 2015, 803: 98–103
- 6 Arnett W D, Bahcall J N, Kirshner R P, et al. Supernova 1987A. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1989, 27: 629–700
- 7 Khokhlov A, Oran E, Thomas G. Numerical simulation of deflagration-to-detonation transition: The role of shock-flame interactions in turbulent flames. *Combust Flame*, 1999, 117: 323–339
- 8 Yang J, Kubota T, Zukoski E E. Applications of shock-induced mixing to supersonic combustion. *AIAA J*, 1993, 31: 854–862
- 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 Prestridge K, Orlicz G, Balasubramanian S, et al. Experiments of the Richtmyer-Meshkov instability. *Proc R Soc A*, 2013, 371: 20120165
- 12 Zhai Z, Zou L, Wu Q, et al. Review of experimental Richtmyer-Meshkov instability in shock tube: From simple to complex. *P I Mech Eng C-J Mech Eng Sci*, 2018, 232: 2830–2849
- 13 Liu H, Xiao Z. Scale-to-scale energy transfer in mixing flow induced by the Richtmyer-Meshkov instability. *Phys Rev E*, 2016, 93: 053112
- 14 Meng B, Zeng J, Tian B, et al. Modeling and verification of the Richtmyer-Meshkov instability linear growth rate of the dense gas-particle flow. *Phys Fluids*, 2019, 31: 074102
- 15 Wang L F, Wu J F, Guo H Y, et al. Weakly nonlinear Bell-Plesset effects for a uniformly converging cylinder. *Phys Plasmas*, 2015, 22: 082702
- 16 Zhai Z G, Zhang F, Zhou Z B, et al. Numerical study on Rayleigh-Taylor effect on cylindrically converging Richtmyer-Meshkov instability. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 124712
- 17 Wu Z, Huang S, Ding J, et al. Molecular dynamics simulation of cylindrical Richtmyer-Meshkov instability. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2018, 61: 114712
- 18 Liang Y, Liu L, Zhai Z, et al. Evolution of shock-accelerated heavy gas layer. *J Fluid Mech*, 2020, 886: A7
- 19 Liang Y, Zhai Z G, Luo X S. Interaction of strong converging shock wave with SF₆ gas bubble. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2018, 61: 064711
- 20 Ding J, Li J, Sun R, et al. Convergent Richtmyer-Meshkov instability of a heavy gas layer with perturbed outer interface. *J Fluid Mech*, 2019, 878: 277–291
- 21 Zhang Q, Guo W. Universality of finger growth in two-dimensional Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov instabilities with all density ratios. *J Fluid Mech*, 2016, 786: 47–61

- 22 Zhang Q, Deng S, Guo W. Quantitative theory for the growth rate and amplitude of the compressible Richtmyer-Meshkov instability at all density ratios. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 174502
- 23 Endo T, Shigemori K, Azechi H, et al. Dynamic behavior of rippled shock waves and subsequently induced areal-density-perturbation growth in laser-irradiated foils. *Phys Rev Lett*, 1995, 74: 3608–3611
- 24 Ishizaki R, Nishihara K. Model of hydrodynamic perturbation growth in the start-up phase of laser implosion. *Phys Rev E*, 1998, 58: 3744–3767
- 25 Briscoe M G, Kovitz A A. Experimental and theoretical study of the stability of plane shock waves reflected normally from perturbed flat walls. *J Fluid Mech*, 1968, 31: 529–546
- 26 Fraley G. Rayleigh-Taylor stability for a normal shock wave-density discontinuity interaction. *Phys Fluids*, 1986, 29: 376–386
- 27 Bates J W. Initial-value-problem solution for isolated rippled shock fronts in arbitrary fluid media. *Phys Rev E*, 2004, 69: 056313
- 28 Mostert W, Pullin D I, Samtaney R, et al. Singularity formation on perturbed planar shock waves. *J Fluid Mech*, 2018, 846: 536–562
- 29 Mostert W, Pullin D I, Samtaney R, et al. Spontaneous singularity formation in converging cylindrical shock waves. *Phys Rev Fluids*, 2018, 3: 071401
- 30 Liang Y, Ding J, Zhai Z, et al. Interaction of cylindrically converging diffracted shock with uniform interface. *Phys Fluids*, 2017, 29: 086101
- 31 Zou L, Al-Marouf M, Cheng W, et al. Richtmyer-Meshkov instability of an unperturbed interface subjected to a diffracted convergent shock. *J Fluid Mech*, 2019, 879: 448–467
- 32 Zou L, Liu J, Liao S, et al. Richtmyer-Meshkov instability of a flat interface subjected to a rippled shock wave. *Phys Rev E*, 2017, 95: 013107
- 33 Jones M A, Jacobs J W. A membraneless experiment for the study of Richtmyer-Meshkov instability of a shock-accelerated gas interface. *Phys Fluids*, 1997, 9: 3078–3085
- 34 Collins B D, Jacobs J W. PLIF flow visualization and measurements of the Richtmyer-Meshkov instability of an air/SF₆ interface. *J Fluid Mech*, 2002, 464: 113–136
- 35 Zhang W, Wu Q, Zou L, et al. Mach number effect on the instability of a planar interface subjected to a rippled shock. *Phys Rev E*, 2018, 98: 043105
- 36 Bai J S, Liu J H, Wang T, et al. Investigation of the Richtmyer-Meshkov instability with double perturbation interface in nonuniform flows. *Phys Rev E*, 2010, 81: 056302
- 37 Kumar S. An Experimental Investigation of Richtmyer-Meshkov Instability. Dissertation for Doctoral Degree. Pasadena: California Institute of Technology, 2003
- 38 Ding J, Si T, Yang J, et al. Measurement of a Richtmyer-Meshkov instability at an air-SF₆ interface in a semiannular shock tube. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 014501
- 39 Luo X, Ding J, Wang M, et al. A semi-annular shock tube for studying cylindrically converging Richtmyer-Meshkov instability. *Phys Fluids*, 2015, 27: 091702
- 40 Al-Marouf M, Samtaney R. A versatile embedded boundary adaptive mesh method for compressible flow in complex geometry. *J Comput Phys*, 2017, 337: 339–378
- 41 Al-Marouf M. A Versatile Embedded Boundary Adaptive Mesh Method for Compressible Flow in Complex Geometry. Dissertation for Doctoral Degree. Thuwal: King Abdullah University of Science and Technology, 2018
- 42 Colella P. Multidimensional upwind methods for hyperbolic conservation laws. *J Comput Phys*, 1990, 87: 171–200
- 43 Al-Marouf M, Samtaney R, Zou L. The Richtmyer-Meshkov instability of a flat interface initiated by a perturbed shock. In: Proceedings of the 31st International Symposium on Shock Waves, Nagoya, Japan, July 9–14, 2017
- 44 Zou L, Al-Marouf M, Samtaney R. A computational study for the interaction of cylindrically converging diffracted shock with uniform interface. In: Proceedings of the 16th International Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing, Marseilles, France, July 15–20, 2018
- 45 Zou L, Al-Marouf M, Cheng W, et al. Atwood number effect on the Richtmyer-Meshkov instability of a cylindrically uniform interface. In: Proceedings of the 32nd International Symposium on Shock Waves, Singapore, July 14–19, 2019
- 46 Xiang G, Wang B. Numerical study of a planar shock interacting with a cylindrical water column embedded with an air cavity. *J Fluid Mech*, 2017, 825: 825–852
- 47 Zhang W, Zou L, Zheng X, et al. Numerical study on the interaction of a weak shock wave with an elliptic gas cylinder. *Shock Waves*, 2019, 29: 273–284
- 48 Zhang W, Zou L. The instability of a planar interface subjected to a sinusoidal rippled shock. In: Proceedings of the 16th International Workshop

on the Physics of Compressible Turbulent Mixing, Marseilles, France, July 15–20, 2018

- 49 Sun M, Takayama K. Conservative smoothing on an adaptive quadrilateral grid. *J Comput Phys*, 1999, 150: 143–180
- 50 Zou L Y, Zhai Z G, Liu J H, et al. Energy convergence effect and jet phenomenon of shock-heavy spherical bubble interaction. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2015, 58: 124703
- 51 Zhai Z, Liang Y, Liu L, et al. Interaction of rippled shock wave with flat fast-slow interface. *Phys Fluids*, 2018, 30: 046104
- 52 Ishizaki R, Nishihara K, Sakagami H, et al. Instability of a contact surface driven by a nonuniform shock wave. *Phys Rev E*, 1996, 53: R5592–R5595
- 53 Ishizaki R, Nishihara K, Wouchuk J G, et al. Rippled shock propagation and hydrodynamic perturbation growth in laser implosion. *J Mater Process Tech*, 1999, 85: 34–38
- 54 Kane J O, Robey H F, Remington B A, et al. Interface imprinting by a rippled shock using an intense laser. *Phys Rev E*, 2001, 63: 055401
- 55 Liu J H, Zou L Y, Liao S F, et al. The Richtmyer-Meshkov instability by diffracted incident shock waves and reshock (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 1203–1212 [刘金宏, 邹立勇, 廖深飞, 等. 绕射激波和反射激波冲击下的Richtmyer-Meshkov不稳定性. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 1203–1212]
- 56 Zou L, Liu J, Liao S, et al. Richtmyer-Meshkov growth of a flat interface. In: Proceedings of the 15th International Workshop on the Compressible Turbulent Mixing, Sydney, Australia, July 10–15, 2016
- 57 Zhou Y. Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov instability induced flow, turbulence, and mixing. I. *Phys Rep*, 2017, 720-722: 1–136
- 58 Liao S, Zhang W, Chen H, et al. Atwood number effects on the instability of a uniform interface driven by a perturbed shock wave. *Phys Rev E*, 2019, 99: 013103
- 59 Liao S, Zou L, Liu J. Experimental investigation of Richtmyer-Meshkov instability induced by a nonuniform shock wave before and after reshock. In: Proceedings of the 32nd International Symposium on Shock Waves, Singapore, July 14–19, 2019

Research progress of general Richtmyer-Meshkov instability

ZOU LiYong^{*}, WU Qiang & LI XinZhu

*Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, China*

Richtmyer-Meshkov (RM) instability has attracted wide attention due to its academic significance and engineering application in many fields. Previous studies show majority of research on shock-induced interface instability dealt with the classic RM instability (referring to the uniform incident shock interacting with initially perturbed interface) which followed after Richtmyer's seminal work. In recent decades, much interest has been paid to the generalized RM instability (standing for the rippled incident shock interacting with material interface) and great progresses have been achieved through experimental and numerical investigations. In this article, we review the developments of methods used to study generalized RM instability. Three kinds of experimental method and three sets of numerical codes are introduced. Images obtained by those methods and post treatment analysis are presented, including the incident shock shape, shock strength, density ratio effects and physical mechanism and theoretical model on the evolution of generalized RM instability in both planar and convergent geometry cases. Finally, based on the limitation of current studies, we propose the following four directions for future study: comparison of turbulent mixing processes induced by general and classic RM instability; general RM experiment at extremes; advanced diagnostic techniques; theory, computation and underlying mechanism.

classic RM instability, general RM instability, shock, interface, pressure perturbation

PACS: 47.54.De, 47.20.Ma, 47.40.-x

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0024](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0024)