

中国力学学会优秀博士学位论文奖推荐表

(2020 年度)

填表日期：2021-07-02

论文题目	激波冲击下多模、多层和多相界面的演化研究		
作者姓名	梁煜	获得学位所在单位	中国科学技术大学
答辩日期	2020-05-31	获得学位日期	2020-07-17
二级学科	流体力学	论文涉及研究方向	流动不稳定性
导师	罗喜胜, 翟志刚	导师研究方向	流动不稳定性, 相变
作者手机		E-mail	
CSTAM会员	否	会员号	
推荐单位/理事 联系人	余年琴	联系人E-mail	
联系人手机		是否获校优秀博士 论文	是

攻读博士学位期间及获得博士学位后一年内获得与博士学位论文有关的成果（包括学术论文、专著、获奖项目和专利项目，限填8项）

1.	Liang Yu, Liu Lili, Zhai Zhigang, Si Ting and Wen Chih-yung. Evolution of shock-accelerated heavy gas layer. <i>J. Fluid Mech.</i> , 886, A7, 2020.	5.	Liang Yu, Ding Juchun, Zhai Zhigang, Si Ting and Luo Xisheng. Interaction of cylindrically converging diffracted shock with uniform interface. <i>Phys. Fluids</i> , 29(8), 086101, 2017.
2.	Liang Yu, Zhi Zhigang, Luo Xisheng and Wen Chih-yung. Interfacial instability at a heavy/light interface induced by rarefaction waves. <i>J. Fluid Mech.</i> , 885, A42, 2020.	6.	Liang Yu, Zhai Zhigang and Luo Xisheng. Interaction of strong converging shock wave with SF6 gas bubble. <i>Sci. China-Phys. Mech. Astron.</i> , 61(6), 064711, 2018.
3.	Liang Yu, Jiang Yazhong, Wen Chih-yung and Liu Yao. Interaction of a planar shock wave and a water droplet embedded with a vapour cavity. <i>J. Fluid Mech.</i> , 885, R6, 2020.	7.	梁煜, 关奔, 翟志刚, 罗喜胜. 激波汇聚效应对球形气泡演化影响的数值研究. <i>物理学报</i> , 66, 064701, 2017.
4.	Liang Yu, Zhai Zhigang, Ding Juchun and Luo Xisheng. Richtmyer-Meshkov instability on a quasi-single-mode interface. <i>J. Fluid Mech.</i> , 872, 729-751, 2019.	8.	Luo Xisheng, Liang Yu, Si Ting and Zhai Zhigang. Effects of non-periodic portions of interface on Richtmyer – Meshkov instability. <i>J. Fluid Mech.</i> , 861, 309-327, 2019.

论文的主要创新点及学术影响:

本文通过激波管实验、数值模拟和理论分析结合的方法，

(1) 系统研究了激波冲击下由多个主控模态组成的复杂多模界面的演化，获得了类单模界面及非周期性多模界面精细的演化图像，发现了扰动非周期性改变了界面平衡位置的规律，构建了一个普适的非线性模型，揭示了模态耦合和非线性效应对扰动振幅及混合宽度发展的影响机理。

(2) 精巧设计了激波冲击下多层界面演化的实验，获得了双层界面演化的精细图像，首次量化了稀疏波诱导的Rayleigh-Taylor不稳定性对界面扰动增长的影响规律，揭示了界面耦合对扰动发展的影响机制。

(3) 实验研究了激波冲击液滴中含气泡的多相界面演化，清晰地捕捉到了气泡坍塌和膨胀过程中横向射流及水射流的产生等新现象，构建了预测液滴中蒸气泡尺寸变化的非线性模型，揭示了气液两相耦合对界面不稳定性发展具有促进效应。



推荐意见: (不超过300字)

激波冲击下的界面演化是一类重要的流体力学现象，在惯性约束核聚变、超声速燃烧等工程领域中具有重要的研究价值。梁煜同学的博士学位论文以此为选题，通过激波管实验、数值模拟和理论分析相结合的方法，对激波冲击下多模、多层和多相界面的演化展开了系统深入的研究，取得了系列创新进展，具有重要的学术意义和很好的应用价值。该博士学位论文写作逻辑严密，分析正确。论文工作量大，理论分析、实验研究和数值模拟相结合，特色和创新点突出，研究成果达到国际领先水平，是一篇非常优秀的博士论文。

(推荐单位填写此栏)

声明：本单位承诺，所提供的推荐材料真实有效，愿意承担相应责任。如产生争议，保证积极调查处理。

学位评定委员会主席： _____

单位公章：

推荐单位负责人签字：

年 月 日

(中国力学学会理事推荐填写此栏)

声明：本人承诺，所提供的推荐材料真实有效，愿意承担相应责任。如产生争议，保证积极调查处理。

推荐人(签名)：

电话：

电子邮箱：



博士学位论文综合介绍材料

一、选题意义：

1. 论文选题的理论意义及实用价值

Richtmyer-Meshkov (RM) 不稳定性是指激波冲击具有初始扰动的两种流体之间的分界面时，界面上的扰动逐渐增长并最终形成湍流的物理过程。由于RM不稳定性起源于斜压涡量的作用，因此RM不稳定性被认为是瞬时冲击的Rayleigh-Taylor (RT) 不稳定性。RM不稳定性最早得名于Richtmyer于1960年针对激波冲击正弦界面问题的线性稳定性理论分析和数值模拟的结果。Richtmyer提出的理论随后被Meshkov于1969年通过激波管实验所证实。RM不稳定性是一项流体力学的基础科学研究，同时也在惯性约束核聚变 (ICF)、超新星爆发和超燃冲压发动机等实际问题中具有重要的研究意义。例如，在ICF中，多束强激光或者X射线照射在球形聚变靶丸的外壳上时，靶丸外层的烧蚀材料以等离子体向外喷射，同时形成极强的球形汇聚激波向内传播。强汇聚激波在向内汇聚的过程中不断压缩内层的氘氦燃料，使燃料在中心处达到极高的温度和压力，从而引发聚变反应。但在实际情况中，首先，多束激光或者X射线照射靶丸的幅度不均一会导致球形汇聚激波的对称性不好，也就是说激波面上存在扰动；另外，靶丸内的多层界面由于加工工艺的限制也存在一定的扰动。因此，在扰动激波与扰动界面的相互作用的过程中，流场界面上出现RM不稳定性，界面失稳混合加剧，从而降低了靶丸中燃料的纯度、限制温度和压力的提升，最终导致聚变反应无法发生，即点火失败。但在超燃冲压发动机的问题中，RM不稳定性加强了燃料和氧化剂的接触面上的混合，促进了燃烧效益，增强了发动机的推力。因此，研究如何抑制或者促进RM不稳定性的发展都是十分重要的。近年来激波诱导的RM不稳定性发展得到了越来越多的关注。

当激波冲击流体界面后，压力梯度和密度梯度的不重合通过斜压机理在界面上沉积涡量。这里，定义涡量 $\omega = \nabla \times \vec{v}$ ，其中 \vec{v} 是速度。描述涡量生成及演化的方程为（这里忽略了耗散项）：

$$\frac{d\omega}{dt} = (\omega \cdot \nabla)\vec{v} - \omega \nabla \cdot \vec{v} + \frac{\nabla \rho \times \nabla p}{\rho^2},$$

其中， $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla$ 是迁移导数， ρ 是密度以及 p 是压力。等号右侧第一项是涡拉伸项，因为涡量和速度场在二维空间中是正交的所以这一项是0。但涡拉伸项在三维湍流中是一个涡量产生的基础机制因而不可忽略，其与大雷诺数湍流中大结构向小结构通过惯性子区倾泻能量有关。等号右侧第二项是压缩项，是由激波的高强度压缩产生的涡量，在强激波和反射激波的情况下需要考虑。等号右侧第三项是斜压项，也是RM不稳定性中涡量产生机制中最为重要的一项，在激波与扰动界面相互作用的过程中这一项最为重要。激波冲击单模界面后，界面上的初始扰动逐渐增长。在界面演化的线性阶段（界面上的扰动振幅小于波长的10%），界面保持着单值函数的形式。然后在界面演化的非线性阶段，轻流体浸入重流体的部分，即气泡结构，逐渐变宽；同时重流体浸入轻流体的部分，即尖钉结构，逐渐变窄。在界面演化的



过程中，涡量合并于强涡核中，造成了尖钉结构如“蘑菇”般卷起。最后，二次不稳定性在界面上发展，无论界面的初始形状如何，界面最后都会演化成混合层。实际上，无论在自然界还是在工程应用上，界面通常是拥有有限厚度的三维宽频谱结构。在这种情况下，界面演化从线性阶段到非线性阶段的转变伴随着模态从高频向低频的转变，因此模态之间的相互作用非常强。

论文从RM不稳定性中最基础的单模界面的演化研究入手，逐渐将初始界面复杂化，研究了激波冲击下多模、多层和多相界面的演化，以及扰动激波冲击下的广义RM不稳定性的发展。

2. 对本学科及相关领域的综述与总结

- 1) 自然界中的物质界面均是多模扰动界面。激波与多模界面相互作用会产生一个非常复杂且有可能在后期达到湍流的混合层。多模RM不稳定性界面演化的后期扰动增长或渐近规律仍是一个开放问题。界面初始扰动的数学形式对于界面混合区的生长以及决定其是否能进入充分发展的湍流混合阶段至关重要。从理论上讲，描述多模态界面扰动增长的模型主要有四种：线性模型，模态模型，势能模型和涡旋模型。第一，基于每个模态在线性阶段独立发展的原理，Mikaelian于2005年提出了一个线性模型，通过叠加随时间变化的每个模态振幅的线性增长来描述多模界面的演化。第二，Haan于1991年提出了具有二阶精度的模态模型，用于量化非线性较早阶段对每个模态扰动增长的模态竞争效应。模态模型及其扩展类型已在RT不稳定问题中获得了广泛的验证，但仍缺乏在RM不稳定方面的应用。第三，假设气泡达到渐近增长之前没有模态竞争，Alon等人于1995年提出了一个势流模型来描述气泡在湍流阶段的分布和发展。但是，势流模型不适用于低密度比的条件。第四，Rikanati等人于1998年采用涡模型研究了低密度比条件下的气泡渐近增长率。实验方面，Sadot等人于1998年开展了双气泡竞争的激波管实验，发现模态竞争在促进了较大气泡演化的同时，抑制了较小气泡的生长。Dimonte和Schneider于2000年开展了一系列的三维线性电机实验来研究多模RT和RM不稳定性，并发现流体的密度比对气泡的自相似增长因子的影响有限。当密度比较大时，尖钉的自相似增长因子明显大于气泡的增长因子。Niderhaus和Jacobs于2003年使用了两种不相融的液体来研究多模RM不稳定性，并发现多模扰动的发展在很大程度上取决于初始模态的相对幅度。Balasubramanian等人于2013年采用气帘技术来形成多模界面，并发现多模扰动的增长对初始条件的依赖性较小，但并不完全独立于初始条件。Mohaghar等人于2019年使用针对流场的密度和速度的测量数据研究了多模界面的混合，并发现流动显示出了对初始条件的独特记忆，而长波扰动对界面的发展影响很大。Liang等人于2019年研究了弱非线性阶段的单模和四种准单模界面振幅增长的差异，并确定了高阶模态对界面扰动增长的影响可以通过多模界面的傅立叶展开式进行评估。Luo等人于2020年研究了弱激波冲击下的双模RM不稳定性，发现当一个构成模波数是另一个构成模波数的两倍时，模竞争对



RM不稳定性发展的影响不可忽略。Mansoor等人于2020年利用了一种新颖的无膜技术，形成了一个模态主控的近正弦界面，讨论了界面初始振幅对界面的影响混合宽度增长和混合过渡。

总的来说，由于初始条件准确可控的多模界面生成困难，所以关于多模界面扰动发展与初始条件之间的关系依然饱受争议。因此开展初始条件精确可控的多模界面RM不稳定性的实验和理论研究极其重要。

- 2) 在ICF中，靶丸主要由烧蚀材料层、主要燃料层和氘氚燃料层组成。当靶丸受到多数激光或者X射线的照射，强激波会与不同材料层之间的界面相互作用从而引发RM不稳定的发展。因此，研究激波冲击下由多道界面构成的气层的演化是十分重要的。Taylor于1950年首先研究了在重力的作用下液体层的RT不稳定性，获得了两道界面上扰动振幅增长的线性解。随后，Ott于1972年给出了一个细的流体层上的RT不稳定性的非线性解，并且解释了界面上尖钉和气泡结构的形成。Mikaelian于1990年给出了在RT和RM不稳定性情况下，当两道界面分隔三种流体时，每道界面上的振幅线性增长率的解析解简称MIK模型。Jacobs等人于1995年通过对实验结果的统计分析，得到了气层两侧界面的初始振幅会影响气层演化的结论，这与MIK模型定性一致。除此之外，Jacobs等人还得到了对于A\B\A类型的气层情况下两道界面的振幅增长的线性公式。近期，Liu等人于2018年理论分析了由两个叠加的气层在真空环境中演化的情况，发现两个气层的厚度对中间界面上的前三阶谐频的扰动发展有着重要影响，甚至会改变第二阶和第三阶谐频的相位，进而影响了界面的尖钉振幅和气泡振幅的发展。

总的来说，现阶段对多层RM不稳定性发展中涉及到的界面耦合以及波系的影响研究很少，亟待开展针对多层RM不稳定性的实验和理论研究。

- 3) 在ICF中，主要燃料层由固体或液体构成。因此，在ICF的内爆过程中会出现激波与气-固界面或气-液界面的相互作用。本文选取的研究对象是激波与复杂气-液界面的相互作用，而液滴是自然界或科学问题中常见的液相构型。激波与液滴相互作用出现在很多高速流现象中，是一个基础且具有挑战性的两相流问题。由于激波与液滴相互作用在化学过程、航天器保护和超燃冲压发动机等实际问题中的广泛应用，科学家们对该问题的研究已逾半个世纪。在以往的主要研究中，人们更多关注的是激波诱导下液滴的外流场的破碎过程，并且已对液滴的破碎做出了系统性的分类。近年来，激波冲击二维水柱时水柱中出现的气泡以及液滴高速撞击固壁时液滴中出现的气泡吸引了广泛的关注。稀疏波和张力波分别在前者和后者的气泡产生中起到了关键作用。另外，Kondo和Ando于2016年通过数值模拟揭示到水锤激波与液滴相互作用会产生气泡。气泡在液体中的坍塌过程会出现空穴腐蚀，造成周围表面的严重破坏。因此，对于激波诱导含气泡的液滴的变形问题而言，激波-气泡相互作用会对液滴的变形有着重要的影响。

总的来说，由于实验技术的匮乏，关于激波冲击下多相复合液滴的研究几乎没有，因此



针对该问题的实验研究将是开创性的。

- 4) 在自然界或工程应用中, RM不稳定性常常是由扰动激波驱动的。例如在ICF中, 非均匀的强激光会造成靶丸外壳的非均匀烧蚀, 从而造成非均匀的汇聚激波向内传播, 并与界面相互作用从而引发RM不稳定性。又如, 在II类超新星爆发中, 由于中心核的非球型, 沿径向传播的爆炸波是扰动激波, 其与星际物质相互作用从而引发RM不稳定性。因此, 研究扰动激波驱动的RM不稳定性对于研究实际的界面不稳定性问题十分有意义, 但这方面的研究要远远少于经典的RM不稳定性研究。Ishizaki等人于1996年首先通过数值模拟研究了由扰动的活塞产生的扰动激波诱导的界面不稳定性问题, 并且发现扰动激波接触界面时的相位决定了界面的振幅增长率。Ishizaki等人关于扰动激波的相位影响界面振幅发展的分析被之后Kane等人于2001年的激光驱动的扰动激波与无扰动界面相互作用的实验所证实。近期, Zou等人于2017年通过激波绕射圆柱的方式形成扰动激波, 实验研究了扰动激波冲击air/SF₆平直扩散界面的过程, 并统计了随时间界面上的扰动增长。Liao等人于2019年采用与Zou等人相同的实验手段研究了马赫数和Atwood数对界面振幅的线性增长率的影响。

总的来说, 针对扰动激波诱导下的广义RM不稳定性的研究刚刚起步, 广义RM不稳定性展现出来了和经典RM不稳定性十分不同的规律, 开展对该问题的实验和理论研究是十分有意义的。

二、成果创新性:

1. 论文在理论或方法上的创新性

- 1) 首次系统地研究了激波冲击下单模、类单模和多模界面演化的区别, 提出了适用于界面演化的线性、弱非线性和强非线性阶段的具有普适性的多模界面扰动发展模型, 成功地预测了不同初始条件下本文的实验结果以及文献中的实验和数值模拟结果。
- 2) 首次实验研究了由间断界面构成的重气层的 RM 不稳定性的发展, 量化了模态耦合和波系对界面演化的影响, 尤其是重气层内的稀疏波对界面不稳定的方式形成扰动激波, 实验研究了扰动激波冲击 air/SF₆平直扩散界面的过程, 并统计了随时间界面发展的影响。首次将稀疏波诱导的界面不稳定性的发展分为 RT 不稳定性阶段和等效的 RM 不稳定性阶段, 并提出了相应的理论模型。
- 3) 首次开展了激波与含蒸气泡的液滴相互作用的实验, 分析了多相系统中气泡的演化对液滴变形的影响, 并提出了考虑有限液滴体积的情况下的修改的 Rayleigh-Plesset 方程。
- 4) 首次通过实验和数值模拟共同研究了扰动激波冲击下无扰动界面的演化, 给出了扰动激波冲击无扰动界面之后的界面振幅和波长的求解公式, 并给出了预测不同初始条件下界面振幅的发展的线性模型。

2. 创造性成果及效益



- 1) 通过对激波冲击下多模界面演化的研究,首次提出了能够描述多模界面在线性期和非线性期扰动发展的具有普适性的模型,并以第一作者发表《Journal of Fluid Mechanics》1 篇,以第二作者发表《Journal of Fluid Mechanics》2 篇。
- 2) 通过对激波冲击下多层界面演化的研究,首次提出了能够量化界面耦合效应和非线性效应的具有普适性的模型,以及能够量化稀疏波诱导的界面扰动发展的模型,并以第一作者发表《Journal of Fluid Mechanics》2 篇。
- 3) 通过对激波冲击下多相界面演化的研究,首次提出了能够量化在有限尺寸液滴内气泡坍塌的非线性模型,并以第一作者发表《Journal of Fluid Mechanics》1 篇。
- 4) 通过对扰动激波冲击下无扰动界面演化的研究,首次提出了能够预测广义 RM 不稳定性扰动发展的线性模型,并以第一作者发表《Physics of Fluids》1 篇,以第二作者发表《Physics of Fluids》2 篇。

三、综合能力:

1. 论文体现的理论基础与专门知识

论文的主要工作内容是从实验、数值和理论三个方面,基于已有的激波诱导界面演化的研究,更深入地分析了激波冲击下多模、多层和多相界面的演化,并开展了初步的扰动激波诱导界面演化的研究。采用中国科学技术大学近代力学系的水平激波管产生平面激波,采用改进的肥皂膜界面生成初始形状可控的准二维的无扰动界面、单模界面、多模界面和重气层等,用以实验研究平面激波诱导下单模、多模和多层界面的扰动发展以及扰动激波诱导无扰动界面的演化。另外,采用香港理工大学机械工程系水平激波管产生平面激波,通过降低测试段压力的方法产生含蒸气泡的液滴,实验了研究激波诱导多相界面的变形。除此之外,采用高分辨率的迎风 CE/SE 算法和基于有限体积法的 VAS2D 程序分别数值研究了稀疏波诱导重/轻界面的不稳定性发展和扰动激波诱导的无扰动界面的演化。

2. 论文体现作者独立从事科学研究的能力

论文内容丰富、逻辑严密、写作规范、分析正确,得到了一系列创新性的研究成果。这也表明作者在流体力学方面具有坚实宽广的基础理论和系统深入的专门知识,对所研究的问题有深入的了解和综合分析能力,相关研究工作已发表十余篇论文,尤其是在流体力学顶级期刊《Journal of Fluid Mechanics》发表 6 篇论文,具有独立从事科研工作的能力。由于出色的科研成果,论文作者于 2017 年和 2019 年分别获得了研究生国家奖学金,于 2020 年获得了中科院院长特别奖,于 2020 年获得了中国科学技术大学优秀博士学位论文奖。



中国力学优秀博士学位论文推荐表附件材料

1、博士学位论文（共1个附件）

（1）梁煜-博士论文.pdf

2、学位证书（共1个附件）

（1）梁煜-博士学位证书.jpg

3、CSTAM会员证（共0个附件）

4、获得成果栏中学术论文的刊物封面、目录及论文首页（共8个附件）

（1）1.Evolution of shock-accelerated heavy gas layer.pdf

（2）2.Interfacial instability at a heavy_light interface induced by

（3）3.Interaction of a planar shock wave and a water droplet embedded with a

（4）4.Richtmyer-Meshkov instability on a quasi-single-mode interface.pdf

（5）5.Interaction of cylindrically converging diffracted shock with uniform

（6）6.Interaction of strong converging shock wave with SF6 gas bubble.pdf

（7）7.激波汇聚效应对球形气泡演化影响的数值研究.pdf

（8）8.Effects of non-periodic portions of interface on Richtmyer-Meshkov

5、专著封面和版权页（共0个附件）

6、获奖证书及专利证书（共10个附件）

（1）中科院院长特别奖.pdf

（2）中科大优秀博士论文.pdf

（3）安徽省优秀毕业生.pdf

（4）中科大优秀毕业生.pdf

（5）博士研究生国家奖学金.pdf

（6）硕士研究生国家奖学金.pdf

（7）第32届国际激波会议优秀论文奖.pdf

（8）第31届国际激波会议优秀论文奖.pdf

（9）第18届全国激波与激波管学术会议优秀论文奖.pdf

（10）第17届全国激波与激波管学术会议优秀论文奖.pdf

7、其他有助于评选的材料（共1个附件）



(1) 2018到2019年于香港理工大学联合培养的证明.pdf

中国力学学会优秀博士学位论文



20200103090002006494