

激波与 SF₆ 球形气泡相互作用的数值研究

沙莎 陈志华 张庆兵

Numerical investigations on the interaction of shock waves with spherical SF₆ bubbles

Sha Sha Chen Zhi-Hua Zhang Qing-Bing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 015201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.015201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.015201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

掺杂对 CH 样品 Rayleigh-Taylor 不稳定性增长的影响

Experimental investigation on the influence of the dopant ratio on ablative Rayleigh-Taylor instability growth

物理学报.2014, 63(23): 235203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.235203>

柱面内爆驱动金属界面不稳定性的数值模拟研究

Simulation study of interface instability in metals driven by cylindrical implosion

物理学报.2014, 63(15): 155201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.155201>

激波与 SF₆ 梯形气柱相互作用的数值模拟

Richtmyer-Meshkov instability induced by the interaction between shock wave and SF₆ isosceles trapezoid cylinders

物理学报.2014, 63(8): 085205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.085205>

间接驱动的内爆不对称性随腔长和时间变化的研究

Variations of implosion asymmetry with hohlraum length and time in indirect-drive inertial confinement fusion

物理学报.2013, 62(22): 225204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.225204>

烧蚀 RT 不稳定性 X 射线分幅诊断研究进展

Experiment progress of ablative Rayleigh-Taylor instability based on X-ray framing camera

物理学报.2012, 61(7): 075213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.075213>

激波与SF₆球形气泡相互作用的数值研究*沙莎¹⁾²⁾† 陈志华¹⁾‡ 张庆兵²⁾

1) (南京理工大学瞬态物理重点实验室, 南京 210094)

2) (北京电子工程总体研究所, 北京 100854)

(2014年3月23日收到; 2014年8月3日收到修改稿)

本文基于大涡模拟方法, 采用高阶精度格式对平面入射激波以及不同反射距离条件下的反射激波与SF₆重气泡相互作用过程进行了三维数值模拟. 数值结果清晰地显示了SF₆重气泡在激波作用下诱导 Richtmyer-Meshkov 不稳定性过程, 揭示了入射激波以及反射激波在气泡界面聚焦诱导射流的过程, 详细分析了不同反射距离条件下反射激波与SF₆重气泡作用过程及流场结构.

关键词: Richtmyer-Meshkov 不稳定性, SF₆ 气泡, 射流, 混合

PACS: 52.57.Fg, 47.35.Lf, 47.27.ep

DOI: 10.7498/aps.64.015201

1 引言

Richtmyer-Meshkov(RM)不稳定性是因激波与不同密度的流体界面作用而引起的界面失稳现象, 常发生在惯性约束核聚变^[1]、发动机燃料混合^[2]、超新星爆炸以及水下炸药爆炸^[3]等工程领域中. Markstein^[4]首先提出RM不稳定性现象, 随后 Richtmyer^[5]从理论上进行了证明, 而 Meshkov^[6]进行了实验验证.

RM不稳定主要由激波与界面作用时的斜压效应(压力梯度与密度梯度不平行)诱导, 并已进行了大量的理论、数值与实验研究^[7-14]. Haas等^[7]对弱激波与重质、轻质的气泡和气柱的作用过程进行了实验研究, 分析了RM不稳定性作用下的气泡和气柱界面的演化过程. Zhai等^[8]采用VAS2D(2-Dimensional & Axisymmetric Vectorized Adaptive Solver)方法数值研究了平面入射激波与Kr气泡以及SF₆重质气泡的作用过程, 着重分析了激波诱导射流的过程. Zou等^[9]采用高速摄影技术对激波与SF₆椭圆气柱的作用过程进行了实验研究, 详细分析了椭圆纵横比对气柱演化过程的影响. 范美如

等^[10,11]采用MUSCL-Hancock格式, 结合VAS2D方法以及非结构化网格自适应加密技术对平面弱激波与矩形、椭圆、菱形以及两种三角形这五种不同形状的SF₆重质气体界面的作用过程进行了二维数值研究, 分析了不同初始形状的气体界面在激波作用下的演化过程. Si等^[12]选取He作为轻质气体, SF₆作为重质气体, 空气作为环境气体, 采用高速纹影技术对入射激波以及反射激波与重气泡以及轻气泡的作用过程进行了实验研究, 实验结果清晰显示了激波诱导下球形界面的演化过程, 并对该过程中气泡尺寸以及流场环量的变化进行了定量分析. 沙莎等^[14]对激波冲击R22重质气柱所导致的射流与混合过程进行了二维数值模拟与研究.

激波与气泡的相互作用为复杂的三维过程, 激波反射距离长度对气泡界面的演变以及气泡与环境流体混合具有重要影响. 基于此, 本文通过大涡模拟方法(large eddy simulation, LES)方法, 结合高阶混合格式对入射激波以及反射激波与SF₆重气泡的作用过程进行了三维数值模拟, 并通过改变反射距离揭示激波与气泡作用所诱导的RM不稳定性变化规律.

* 国家自然科学基金(批准号: 11272156)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shasha19890629@163.com

‡ 通信作者. E-mail: chenzh@mail.njust.edu.cn

2 计算方法与模型

RM不稳定性后期会诱导湍流产生,并加快界面与环境流体的混合.为了能较为准确地捕捉气泡变形过程,因此,本文选用LES方法对激波及反射激波与气泡相互作用的整个过程进行三维模拟.

数值计算方法与文献[13]基本相同,采用有限体积法对控制方程进行空间离散,时间推进采用三阶TVD Runge-Kutta法,对流项和黏性项分别采用五阶WENO(Weighted Essentially Non-Oscillatory)格式[15,16]和中心差分法进行离散.

WENO格式对ENO的模板进行非线性加权,使其在光滑区域达到更高阶的精度.通过自动调整权重系数,在间断附近退化为ENO算法差分格式,以保证数值解在间断附近没有振荡.WENO格式比

ENO格式具有更好的有效性、通量光滑性以及收敛解的稳定性,且在间断处则与ENO格式一样基本无振荡.因此,WENO格式主要用于包含激波等复杂流动现象的流体运动的数值模拟.采用沉浸边界法(immersed boundary method, IBM)处理气泡复杂边界[17].

计算模型如图1所示,为了方便进行对比验证,计算初始条件与文献[12]的实验初始条件相同,如表1所示,其中, a, b, c 分别为计算域的长宽高, r 为气泡半径, d 为气泡中心距激波管尾端固壁的距离,网格数均经过收敛性检验.气泡内部重质气体采用SF₆,外部环境气体采用空气,气泡内外压力均设为1 atm (1 atm = 1.01325 × 10⁵ Pa).入射激波由左向右传播,上下、前后以及右侧壁面均设为固体反射边界.所采用的气体具体参数如表2所示.

表1 本文采用的计算参数

算例	计算域 ($a \times b \times c$)/m	r /m	d /m	Ma	网格数
Case 1	0.07 × 0.054 × 0.054	0.0145	0.027	1.21	390 × 200 × 200
Case 2	0.0955 × 0.054 × 0.054	0.01625	0.079	1.23	310 × 240 × 240

表2 本文气体特性参数

气体 \ 气体参数	比热比 γ	密度 ρ /(kg/m ³)	摩尔质量/(g/mol)	当地声速/(m/s)
SF ₆	1.09	6.03	146	135
Air	1.4	1.18	29	345

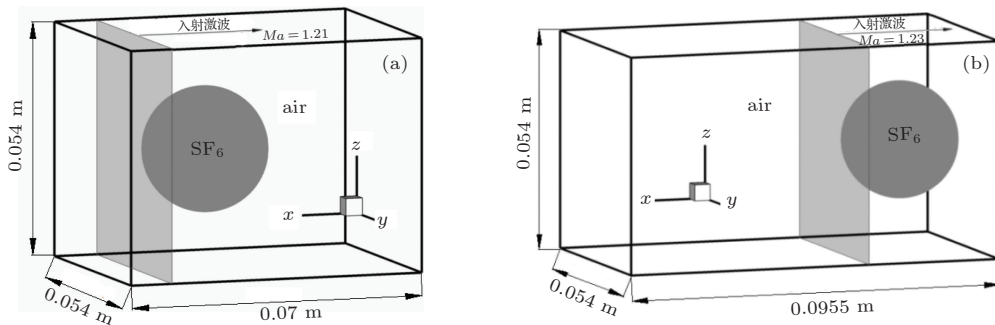


图1 计算模型 (a) Case 1; (b) Case 2

3 结果与讨论

图2为Case 1的数值模拟结果(左、中)与文献[12]的实验纹影(右)序列对比,其中左图为流场 $y=0$ 截面上的纹影,中间为纹影等值面图,右图为文献[12]的实验纹影照片.可知,平面入射激波在SF₆球形界面上透射、绕射以及SF₆气泡发展过程

的数值结果与文献[12]的实验结果相符,仅在激波与气泡作用初期略有出入.这是由于实验中气泡在重力作用下呈椭球形,而数值计算中的模型是标准球形,因此在数值模拟中透射激波在气泡中的聚焦时刻要略晚于实验结果(图2(b)),本文透射激波聚焦位置位于气泡内部右极点左侧,而实验中聚焦位置则是位于气泡右极点位置,因而诱导的射流头部结构略有区别.

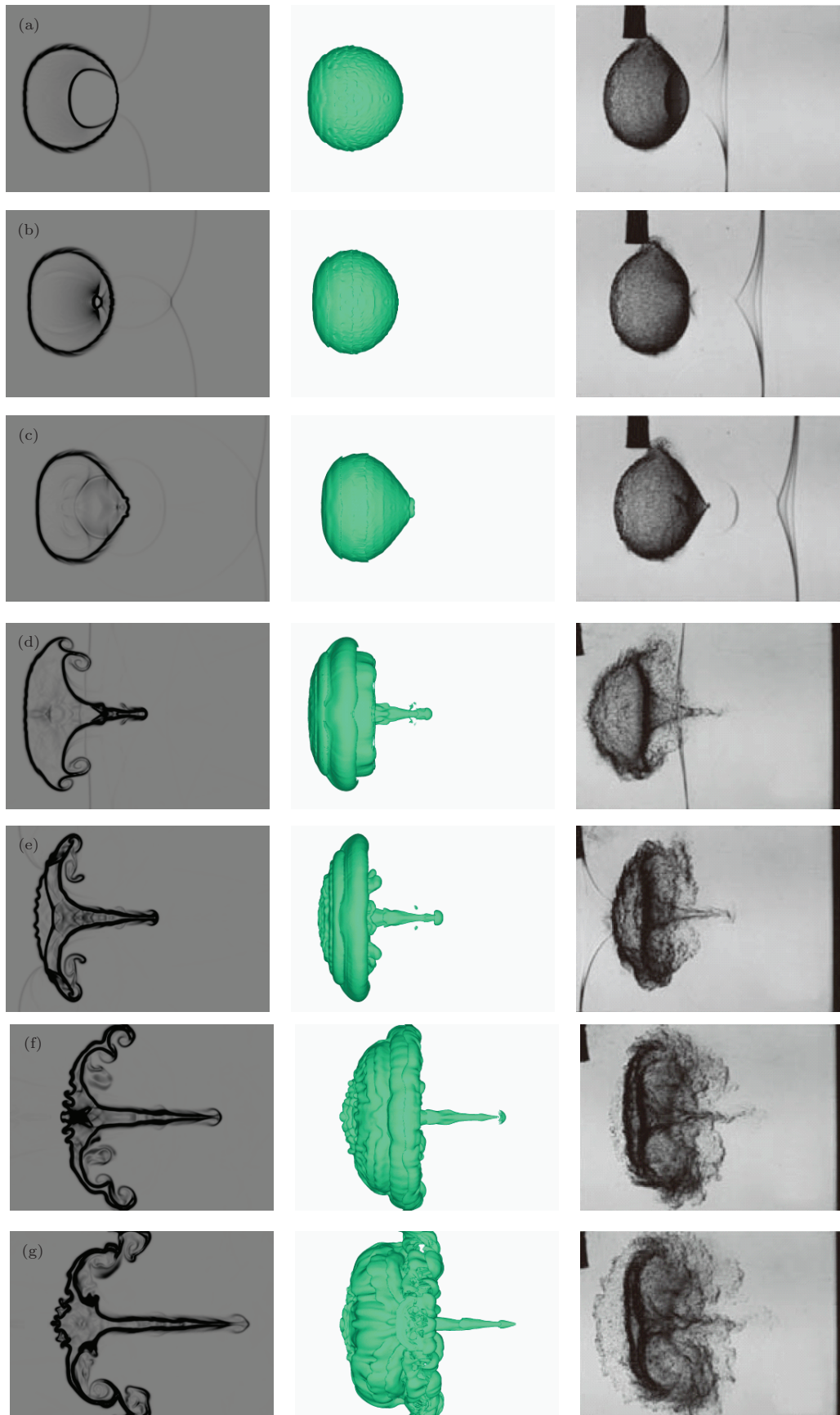


图2 激波与SF₆气泡相互作用过程 (Case 1) 本文模拟结果 (左、中) 文献 [12] 的实验结果 (右) 对比 (a) $t = 100 \mu\text{s}$; (b) $t = 133 \mu\text{s}$; (c) $t = 183 \mu\text{s}$; (d) $t = 400 \mu\text{s}$; (e) $t = 467 \mu\text{s}$; (f) $t = 600 \mu\text{s}$; (g) $t = 767 \mu\text{s}$

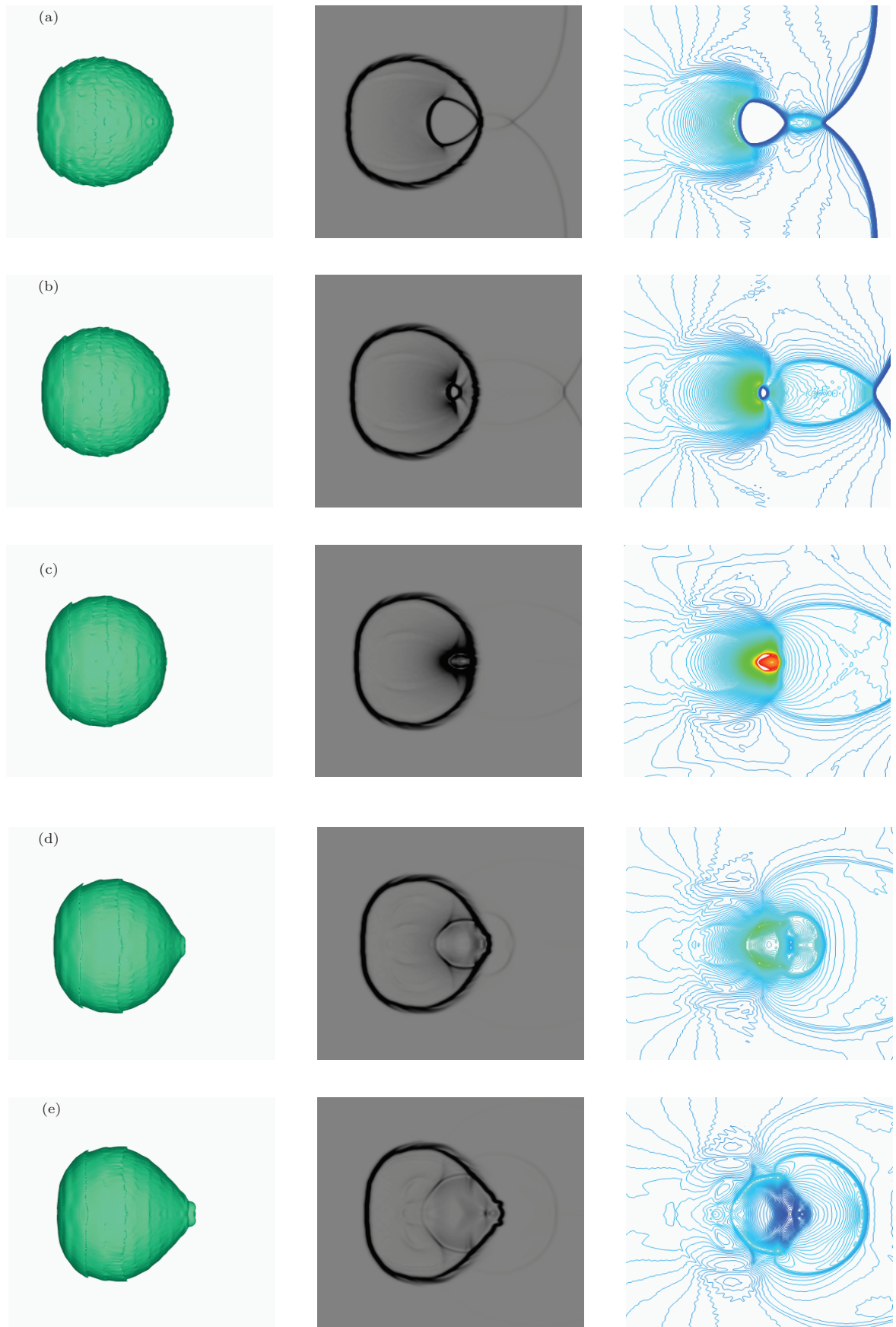


图3 入射激波诱导射流产生过程 (a) $t = 117 \mu\text{s}$; (b) $t = 133 \mu\text{s}$; (c) $t = 150 \mu\text{s}$; (d) $t = 167 \mu\text{s}$; (e) $t = 183 \mu\text{s}$

图2表明,入射激波与SF₆气泡作用过程中,流场基本对称,这与文献[12]的实验结果相同.入射激波在球形界面上发生透射和反射,由于SF₆气体声阻抗高于外部空气,因此气泡内透射激波传播速度小于外部入射激波,入射激波先于透射激波到达气泡右侧,并发生绕射.透射激波在气泡内弯曲且曲率不断增加,导致波阵面面积降低而强度增加(图2(a)).

当绕射激波在气泡外发生碰撞时,透射激波则在气泡内部形成一封闭区域,该区域不断缩小,最终在气泡内部右极点偏左位置缩至最小,并发生类似点爆炸的扩散过程,形成球形高压区,并迅速向外膨胀.其左侧在气泡内向上游传播,而右侧则向下游传播,并与气泡边界作用产生射流结构(图2(b), (c)).同时,气泡界面因斜压机理而向右卷起,并因K-H(Kelvin-Helmholtz)不稳定而形成次级涡.由于反射距离相对较长,反射激波与气泡相互作用时,因气泡已变形,透射激波弯曲程度不够,未能形成高压区诱导射流,仅使气泡在 x 轴上进一步压缩(图2(e), (g)).

为清晰揭示入射激波诱导射流的过程,图3给出了SF₆气泡右极点附近局部流场的纹影等值面

图(左)、流场 $y = 0$ 截面纹影(中)与压力等值线(右).因气泡内外气体的不同气体声阻抗,透射激波在气泡内部围成一个枣核形封闭区域并逐渐缩小,压力不断升高(图3(a), (b)),最终形成点爆炸,产生一个球形高压区,向外膨胀.当高速扩散的激波传播至气泡下游界面时对气泡边界产生瞬间冲击加速,进而形成射流.随着球形激波的膨胀,内部压力降低而转化为低压区,虽然射流速度不断减速,但其速度仍高于周围流场,因此仍向右传播(图3(c)—(e)).

为了描述射流二次涡环的产生,对射流的演变过程的描述如图4所示.射流产生初期,由于受到点爆炸的直接冲击产生最大的向右(下游)传播速度(图4(a)).随着点爆炸高压区逐渐转化为球形低压区,在外部流场压力挤压作用下,气泡右极点位置速度迅速增加,超出圆环结构转而成为射流头部(图4(b), (c)),而该圆环区域则在气泡外部流场压力作用下逐渐向左翻转最终形成二次涡环(图4(d)),并随射流向右传播,在反射激波的作用下最终破碎消失(图4(e)).而射流结构在外部流场压力作用下变得越来越细长,射流头部也在流场阻力作用下逐渐变成蘑菇形(图4(f)).

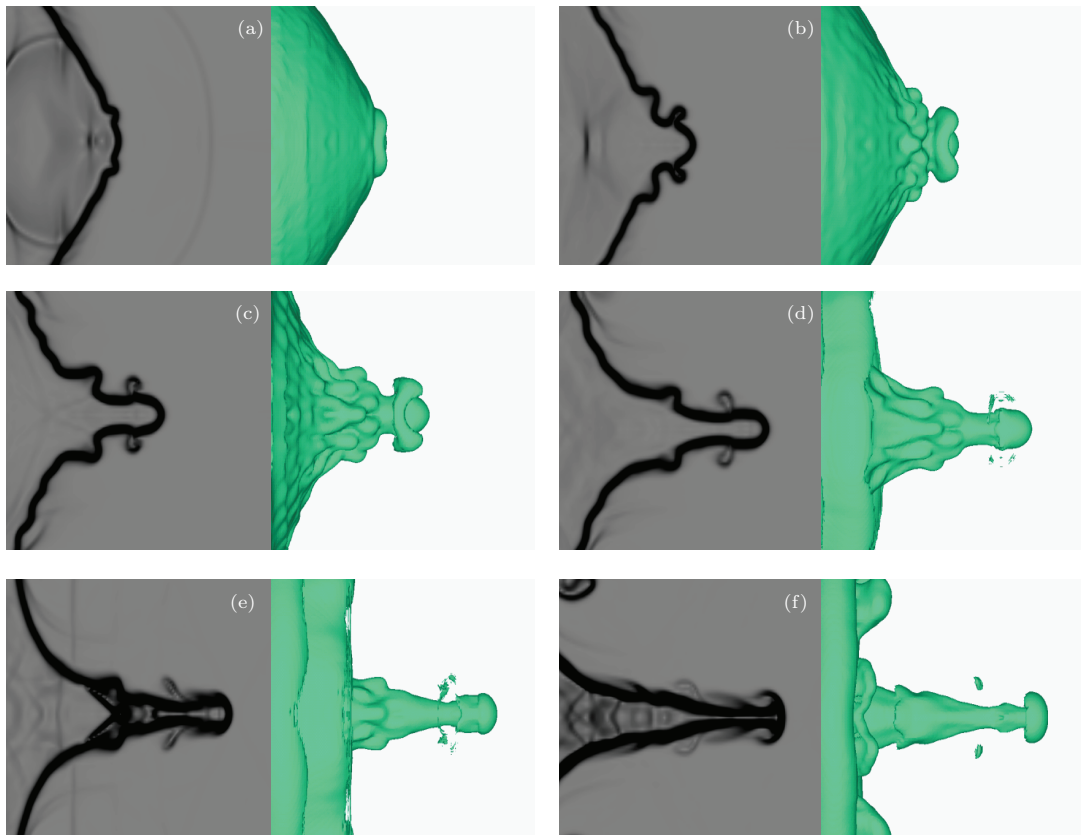
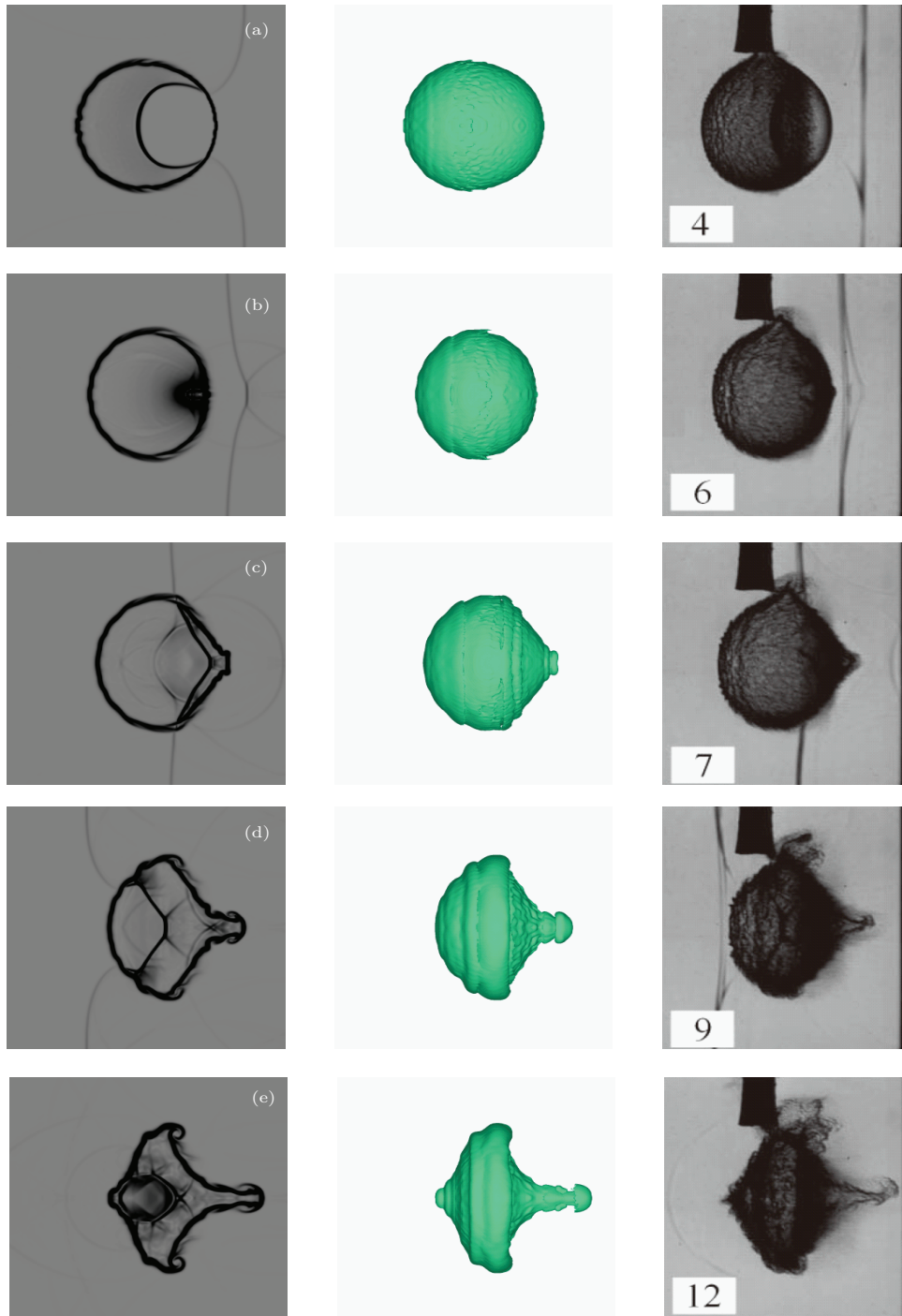


图4 二次涡环产生过程 (a) $t = 183 \mu\text{s}$; (b) $t = 233 \mu\text{s}$; (c) $t = 283 \mu\text{s}$; (d) $t = 333 \mu\text{s}$; (e) $t = 400 \mu\text{s}$; (f) $t = 467 \mu\text{s}$

图5为Case 2的数值模拟结果(左、中)与文献[12]的实验纹影(右)序列对比,其中左图为流场 $y = 0$ 截面的纹影图,中间为密度等值纹影图,右图为文献[12]的实验纹影照片.数值模拟与实验结果符合良好,清晰反映了平面入射激波发生绕射、透射与诱导射流的过程,以及反射激波与变形后的气泡作用诱导二次射流的过程.其中入射激波与SF₆气泡作用过程与Case 1类似(图5(a), (b)),不再赘述.

由于Case 2中的反射距离很短,因此反射激波

与气泡作用时,气泡仍处于变形初期,气泡左侧为半球形,而右侧则在外部流场压力作用变成锥形,初始射流正开始形成.反射激波在锥形界面发生折射,产生一道锥面折射激波(图5(c)).由于气泡内部声阻抗高于外部,气泡内的折射激波的传播速度低于气泡外的反射激波,反射激波先于折射激波传播至气泡左侧进而发生绕射.随着反射激波不断向左传播,气泡内折射激波曲率不断增加,形成高压区并最终在气泡左侧界面诱导反向(向左传播)射流(图5(d)–(g)).



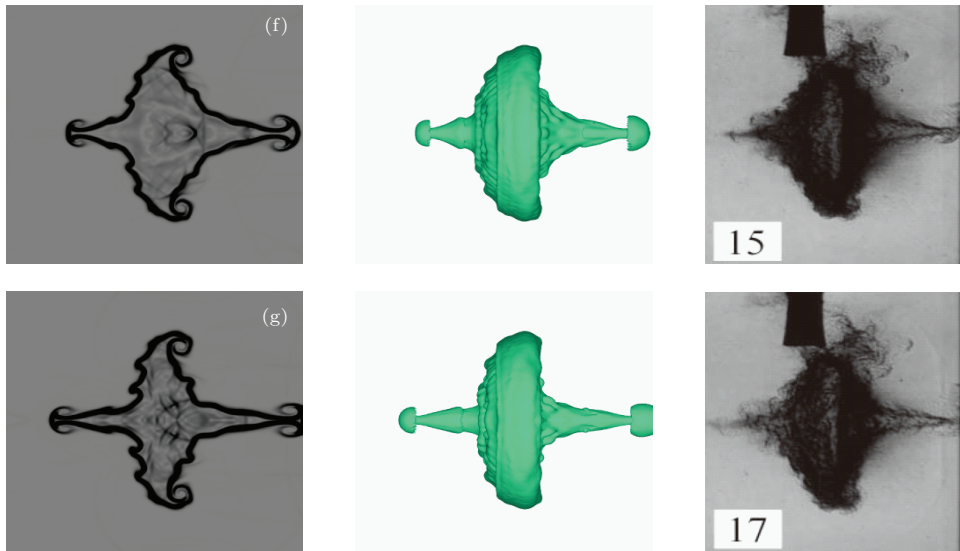


图5 激波与SF₆气泡作用过程 (Case 2) 本文模拟结果 (左、中) 文献 [12] 的实验结果 (右) 对比 (a) $t = 83 \mu\text{s}$; (b) $t = 133 \mu\text{s}$; (c) $t = 167 \mu\text{s}$; (d) $t = 217 \mu\text{s}$; (e) $t = 283 \mu\text{s}$; (f) $t = 383 \mu\text{s}$; (g) $t = 433 \mu\text{s}$

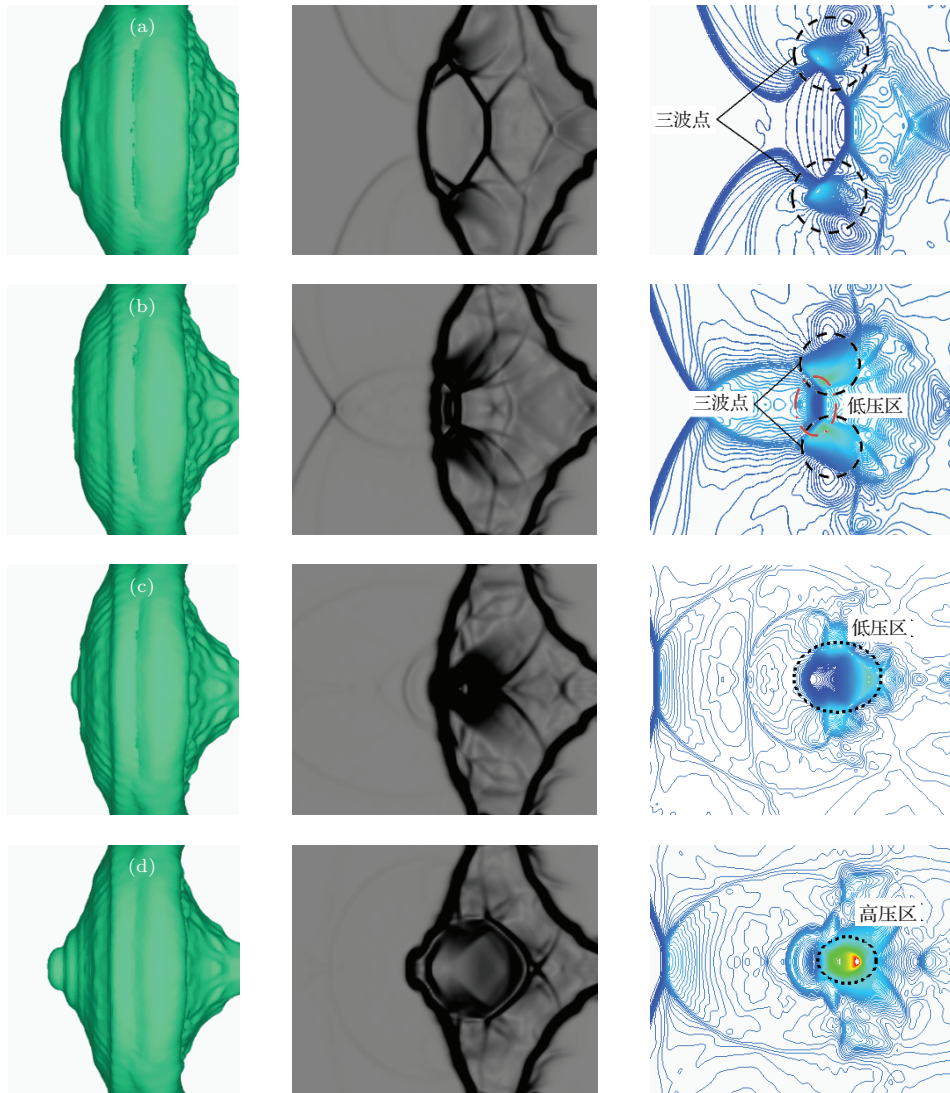


图6 反射激波诱导射流过程 (a) $t = 233 \mu\text{s}$; (b) $t = 250 \mu\text{s}$; (c) $t = 267 \mu\text{s}$; (d) $t = 283 \mu\text{s}$;

为清晰揭示反射激波与气泡作用诱导反向射流的过程, 图6为SF₆气泡左侧附近局部流场的三维纹影(左)、流场 $y = 0$ 截面纹影(中)以及流场 $y = 0$ 截面压力等值线图(右). 可知, 反射激波先于折射激波传播至气泡左侧并发生绕射, 绕射激波在气泡左侧界面上发生折射, 产生一道新的锥形折射激波, 与之前的锥形折射激波之间发生马赫反射, 形成一道环形马赫面以及两道由三波点组成的环形线(图6(a)). 三波点位置产生两个局部高压区, 随着反射激波向左传播, 气泡内部的折射激波的环形波阵面区域不断缩小, 两个局部高压区的压力不断增加, 而折射激波以及马赫面围成的区域内则形成一个低压区, 使气泡左侧界面略有回缩(图6(b)). 两个局部高压区最终在气泡左极点附近汇聚, 形成一个球形高压区并产生一道球形激波. 其左半部分穿过气泡左侧界面时, 对气泡界面造成瞬间冲击加速, 从而诱导射流(图6(c), (d)), 其作用机理与入射激波诱导射流相同.

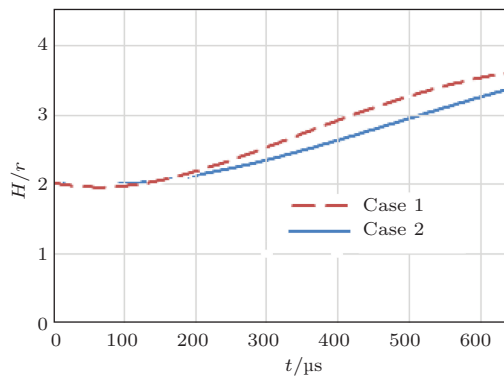


图7 Case 1和Case 2中气泡高度随时间变化曲线

图7为Case 1和Case 2中激波与SF₆气泡作用过程中气泡 y 轴方向高度 H 随时间的变化曲线, 并取初始半径 r 作为参考值进行无量纲化. 可见, 激波与气泡作用初期, 两种条件均处于平面入射激波与气泡作用阶段, 气泡高度变化不大, 均约为初始值. 随着反射激波进入主流场与气泡发生作用, 两种条件下气泡的高度均不断增加, 但Case 1的增加幅度较大. Case 1中的激波反射距离较长, 反射激波与气泡作用时, 气泡已充分变形(呈现扁平)并产生射流, 气泡向右呈碗状卷起, 气泡高度也因此增加; 对于Case 2, 由于反射距离较短, 气泡未能如Case 1充分变形, 过早出现的反射激波与气泡作用在一定程度上减弱了气泡向右翻转的趋势, 因此气泡高度增长速度低于Case 1.

4 结 论

基于LES方法, 采用五阶加权基本无振荡格式结合浸入式边界法对平面入射激波不同反射距离下的反射激波与SF₆重气泡的作用过程进行了三维数值模拟, 模拟结果与相关实验结果符合良好, 准确地描述了激波与SF₆重气泡的作用过程, 并得到以下主要结论:

1. 入射激波以及反射激波与SF₆重气泡诱导射流的机理相同, 均由气泡内外不同声阻抗导致气泡内外激波传播速度不一致, 气泡内透射激波发生弯曲聚焦产生高压区, 当高压区传播至气泡界面时, 对界面产生瞬间冲击加速进而诱导射流.

2. 当反射距离较长(Case 1)时, 反射激波与气泡发生作用时气泡已充分变形, 因而反射激波不能在气泡内形成高压区, 不能诱导反向射流. 而当反射距离较短(Case 2)时, 反射激波与气泡发生作用时气泡仍处于变形初期(仍基本保持圆球形状), 反射激波及其绕射激波在气泡左右界面分别发生折射, 折射激波之间发生马赫反射, 三波点位置产生局部高压区, 该高压区在气泡左侧界面聚焦进而可诱导反向射流. 另外, Case 1(反射距离较长)的气泡横向变形比Case 2(反射距离较短)大.

3. 数值模拟的入射激波诱导的射流头部结构与相关实验结果略有区别, 原因是实验中SF₆气泡在重力作用下略微呈椭球形, 而数值计算则用的球形理论模型, 导致透射激波在气泡内部聚焦位置较实验偏左, 点爆炸产生的高压区与气泡右侧界面直接接触区域为圆环. 该圆环位置在射流发展初期获得最高的初速度, 随后在流场压力作用下向来流方向翻转形成二次涡环, 并可在反射激波作用下破碎.

参考文献

- [1] Lindl J D, McCrory R L, Campbell E M 1992 *Phys Today* **45** 32
- [2] Marble F E, Hendrics G J, Zukoski E E 1987 *Progress towards shock enhancement of supersonic combustion progress*, AIAA 87-1880 [R] US: American Institute of Aeronautics and Astronautics 1987
- [3] Oran E S, Gamezo V N 2007 *Combust Flame* **18** 4
- [4] Markstein G H 1957 *J. Aerosol Sci.* **24** 238
- [5] Richtmyer R D 1960 *Commun. Pure Appl. Math.* **13** 297
- [6] Meshkov E E 1969 *Fluid Dyn.* **4** 101

- [7] Haas J F, Sturtevant B 1987 *J. Fluid Mech.* **181** 41
- [8] Zhai Z G, Si T, Zou L Y, Luo X S 2013 *Acta Mechanica Sinica* **29** 24
- [9] Zou L Y, Liu C L, Tan D W, Huang W B, Luo X S 2010 *J. Vis* **13** 347
- [10] Fan M R, Zhai Z G, Si T, Luo X S, Yang J M 2011 *Scientia Sinica Phys, Mech. & Astron* **41** 862 (in Chinese) [范美如, 翟志刚, 司廷, 罗喜胜, 杨基明 2011 中国科学 **41** 862]
- [11] Fan M R, Zhai Z G, Si T, Luo X S, Zou L Y, Tan D W 2012 *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* **55** 284
- [12] Si T, Zhai Z G, Yang J M, Luo X S 2012 *Physics of Fluids* **24** 054101
- [13] Sha S, Chen Z H, Xue D W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 144701 (in Chinese) [沙莎, 陈志华, 薛大文 2013 物理学报 **62** 144701]
- [14] Huo X H, Wang L F, Tao Y S, Li Y J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 144705 (in Chinese) [霍新贺, 王立锋, 陶焯晟, 李英骏 2013 物理学报 **62** 144705]
- [15] Liu X D, Osher S, Chan T 1994 *Journal of Computational Physics* **115** 200
- [16] Jiang G, Shu C W 1996 *Journal of Computational Physics* **126** 202
- [17] Goldstein D, Handler R, Sirovich L 1995 *Journal of Fluid Mechanics* **302** 333

Numerical investigations on the interaction of shock waves with spherical SF₆ bubbles*

Sha Sha^{1)2)†} Chen Zhi-Hua^{1)‡} Zhang Qing-Bing²⁾

1) (Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science. & Technology. , Nanjing 210094, China)

2) (Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China)

(Received 23 March 2014; revised manuscript received 3 August 2014)

Abstract

Based on the simulation of large eddy current, combined with the high-precision computational scheme, the study of planar shock wave and reflected shock waves at different reflected distances, which interact with spherical SF₆ bubbles, is carried out numerically in 3D. Our numerical results show clearly the deformation of spherical interface that is induced by the Richtmyer-Meshkov instability due to the collision of shock wave. Jets induced by incident shock wave and reflected shock waves are revealed, and the flow field of the interactions between the reflected shock waves at different reflected distances and the SF₆ bubbles is also discussed in detail.

Keywords: Richtmyer-Meshkov instability, SF₆ bubbles, jet, mixing

PACS: 52.57.Fg, 47.35.Lf, 47.27.ep

DOI: 10.7498/aps.64.015201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11272156).

† Corresponding author. E-mail: shasha19890629@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: chenzh@mail.njust.edu.cn