文章编号:1000-5773(2012)06-0687-06

斜界面 Rayleigh-Taylor 不稳定性混合实验研究*

刘金宏,谭多望,张 旭,黄文斌,邹立勇

(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实验室,四川绵阳 621900)

摘要:实验研究了不相溶流体斜界面 Rayleigh-Taylor (R-T)不稳定性湍流混合区的混合不对称性特征。利用高压气体加速装有不同液体的箱体,加速度方向由轻液体指向重液体,此时界面是 R-T 不稳定性的。利用阴影测试技术,研究了初始倾角 9°的 $ZnCl_2$ 溶液/正已烷斜界面的演化规律,得出混合区内混合不对称、斜界面倾角渐增的规律。

关键词:Rayleigh-Taylor 不稳定性;湍流混合区;阴影

中图分类号:O357.5 **文献标识码**:A

1 引 言

当低密度流体加速高密度流体时,两流体间界面是 Rayleigh-Taylor (R-T)不稳定的,界面不稳定性的演化及其诱导的湍流混合是多尺度、非线性的复杂问题,研究此类问题不仅在核武器、惯性约束聚变(ICF)等高技术领域具有重要的应用价值,同样在非线性物理等基础科学领域也有重要的理论价值[1]。惯性约束聚变靶丸内爆在本质上是不稳定的,特别地,R-T 不稳定性在初期倾向于破坏内爆壳,后期又会阻止中心热斑的形成;R-T 不稳定性和相关的 Richtmyer-Meshkov 不稳定性,在恒星演化的某些阶段、汽膜的破碎、地下的盐结晶坡面(Salt Dome)和火山岛等许多复杂现象中起重要作用[2]。

界面不稳定性在 ICF 等高新技术领域的需求下,自 20 世纪 80 年代以来国外开展了许多精细的、创新性的实验研究工作。在重力作用下不相溶两种流体的界面为自然随机界面,国外开展了较多实验,研究此界面的混合发展历程。Read 采用竖直加速箱体研究两种流体界面 R-T 不稳定性的演化,得到的气泡增长系数 $\alpha_b \approx 0.07$[3]。Kucherenko 采用气体枪驱动装有样品的箱体,加速度可达 $3\,000g$(g 为重力加速度),利用 X 射线测试混合区混合的浓度,当浓度范围为 0~100%时 $\alpha_b \approx 0.07$,而浓度范围为 2%~98%时 $\alpha_b \approx 0.055$[4]。Dimonte 利用直线发动机(Linear Electric Motor)加速箱体,得到了复杂加速过程的 R-T 不稳定性发展特征[5]。Dalziel 等利用滑板隔离两种不同流体,实验时将滑板抽出,由此研究重力场下两种流体界面混合的过程[6]。Holford 利用隔板分离两种不同密度液体,得到了初始倾角为 10°的斜界面(重流体在上),实验时将隔板抽出,由此研究重力场下两种流体 R-T 不稳定性的混合过程[7]。Невмержицкий 利用爆炸气体驱动方式,研究高加速(加速度峰值可达 $10^5 g$)下,可变 Atwood 数气液界面 R-T 不稳定性的发展过程[8]。Dimonte 等长期从事界面不稳定性研究的专家,利用高精度三维数值方法,对比研究了小波长界面 R-T 不稳定性混合问题:气泡直径与气泡增长宽度的关系与实验结果较为吻合,而气泡增长系数较实验结果较小[9]。谢正桐等对界面不稳定性进行了较多的数值研究[11-13]。实验方面,施红辉早期在圆形激波管装置中[14],后采用方形激波管[15],利用高压气体直接驱

* 收稿日期:2011-05-25;修回日期:2011-12-18
基金项目:国家自然科学基金(11072226);国防科技重点实验室基金(9140C6710011006)
作者简介:刘金宏(1972—),男,硕士研究生,主要从事界面不稳定性实验研究. E-mail:ljhcaep@21cn.com

动水柱，由此研究气液界面 R-T 不稳定性问题。黄文斌利用果冻预置不同初始类型界面，研究不稳定性的初始效应[16]。袁永腾等利用神光装置，研究了 X 射线烧蚀平面靶的 R-T 不稳定性[17]。长期以来对 R-T 不稳定混合问题进行了较为详尽的实验和数值理论方面的研究，但对物质间的混合机理的认识还只是经验和半定量的，解决这类问题还有很长的路要走。

不同于 Holford 的实验方法，本研究采用两种不相溶的流体形成自然的水平随机界面，将实验管道预置一定方向，由此研究加速运动过程中斜界面（加速度方向与界面方向不在一条线上时，称界面为斜界面）的 R-T 不稳定性混合特征。利用阴影测试得到混合区 TMZ（Turbulent Mixing Zone）的发展过程，以及平均混入量，混合区的混合比例并不是 1∶1，在加速运动过程中流体界面倾角是渐增的。

2 实验原理及方法

2.1 实验装置

重力作用下，两种不相溶的流体的接触面为水平面（由于表面张力接触面并不是理想的平面，因此一般认为是扰动很小的随机界面）。所谓的斜界面是加速度（重力）方向与接触界面的方向具有一定夹角。因此，只要加速度方向与初始接触界面（水平面）具有一定的夹角，就得到初始接触斜界面。为此，把实验装置倾斜放置，使实验样品的加速度方向与重力（水平面方向）具有一定夹角，这样即形成了初始接触斜界面。图 1(a)为不相溶液-液斜界面 R-T不稳定性实验研究结构示意图。在图 1(a)中：A 为高压驱动段，B 为常压运动段，C 为缓冲垫，D 为实验箱体，E 为隔离 A 与 B 的膜片。实验时，将装置预设一定的倾角（装置可以在 0°～90°范围任意调整）后，往 A 充入一定压力的气体，鼓起的膜片 E 与电热丝靠在一起，电热丝通电后，膜片 E 沿着电热丝破开，这样 A 段的高压气体驱动箱体 D 沿管道加速运动。图 1(b)为实验箱体结构示意图，长方体箱体由上活塞 M 和下活塞 N 连接而成，长方体容器上部开有螺孔 H，实验样品由 H 注入后由螺杆将螺孔封住。实验时将箱体放在管道中，依靠活塞上的 O 型圈与管道间的摩擦力来支撑箱体自重。实验样品中轻流体为正己烷，重流体为 $ZnCl_2$ 溶液。

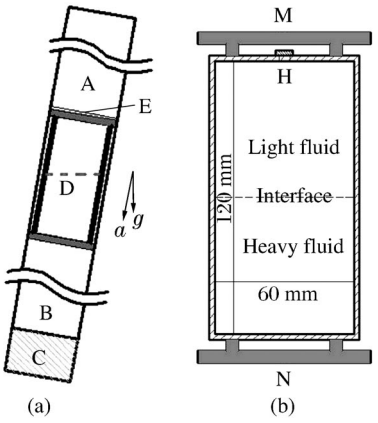


图 1 实验结构示意图

Fig. 1 Schematic of experimental configuration

图 1 所示实验结构的初始条件：箱体空腔（图 1(b)）尺寸为宽度 60 mm、高度 120 mm，测试方向厚度为 40 mm，即箱体容积 $V=288$ mL；重流体 $ZnCl_2$ 溶液的密度为 $\rho_1=1.58$ g/mL，体积 $V_1\approx V/2=144$ mL；轻流体正己烷的密度为 $\rho_2=0.66$ g/mL，体积 $V_2\approx V/2=144$ mL；两流体的密度比 $\eta=\rho_1/\rho_2\approx 2.39$，Atwood 数 $A=(\rho_1-\rho_2)/(\rho_1+\rho_2)\approx 0.41$；图 1(a)中高压段的初始静压为 0.3 MPa；加速度方向与重力的夹角为 9°（斜界面初始倾角）；膜片 E 破开为零时刻。

2.2 实验测试

流体的折射率同其密度相关，对于不同折射率的流场，利用纹影（阴影）测试技术可以将其显示。而界面不稳定性在发展过程中，界面或混合区具有较大的密度梯度。因此，纹影、阴影测试方法在不同密度透明流体间的界面不稳定性实验研究方面得到广泛的应用。图 2 为反射式阴影测试示意图。点光

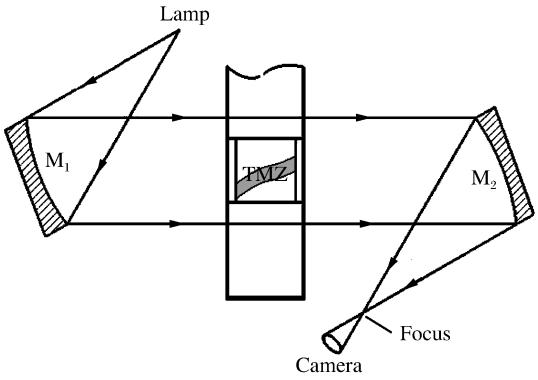


图 2 实验阴影测试示意图

Fig. 2 Sketch of shadowgraph method

源光线经球面反射镜 M_1 反射后得到一束均匀的平行光,平行光路经过实验测试窗口,由球面反射镜 M_2 产生汇聚光路,高速相机在焦点后适当位置对实验段进行测试。本次实验高速相机幅频为 7 000 幅每秒,曝光时间为 4.0 μs 。相比直接拍照,阴影测试的优点有:平行光穿透测试区,避免了俯仰角问题;可以清晰显示具有密度变化的流场,而直接拍照无能为力。

3　实验结果及讨论

本实验高速相机的曝光时间为 4.0 μs,而在实验时间内,箱体的最大运动速度 $v<30$ m/s,可见图像曝光时间上积分位移小于 0.12 mm;图像幅间隔约为0.143 ms,而箱体运动位移的数据点超过 130 个;阴影测试避免了俯仰角效应,像素点与空间位移是对应的。因此,由箱体运动的空间位移来推导箱体运动的加速度是可信的。对空间位移进行四阶曲线拟和,对拟合曲线两次求导,得到加速度方程如下

$$a = -0.006\,3t^2 + 0.050\,2t + 1.113\,0 \quad (1)$$

对应曲线如图 3 所示。

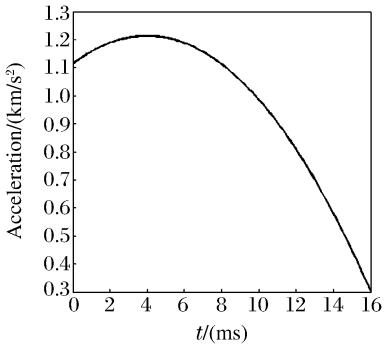


图 3　加速度演化图

Fig. 3　The evolution of acceleration

如图 4 所示,加速度方向与界面方向(密度梯度方向)不一致时,$\nabla p \times \nabla \rho \neq 0$,流体为斜压流体,在界面处产生涡。涡致使两种流体在界面处混合;在轻流体加速重流体的运动过程中,由于惯性力的作用(R-T 不稳定性),轻流体“下沉”,重流体“上浮”(由于体力与加速度方向相反,使得与单一重力场下重流体“下沉”、轻流体“上浮”现象相反)。轻流体和重流体之间产生环流,这一现象类似于盐分不同的地中海与黑海之间海水的环流现象(只是海水没有明显的密度间断面)。如图 5 所示,在阴影测试的原始图像中,混合区(TMZ)与透明流体间的光照度不同,反应在数值图像上的灰度不同。由此对图像可以进行数值处理:设定未混合的轻流体的灰度值为 h_l,未混合的重流体的灰度值为 h_h,混合区的灰度值不变。图 6 为处理后的实验图像,图 6 中的中间区域为混合区 TMZ,上部为未混的轻流体正己烷,下部为未混的重流体 $ZnCl_2$ 溶液。由图 6 可见,由于界面处的涡,致使界面混合区变宽;由于 R-T 不稳定性,在轻流体“下沉”和重流体“上浮”的过程中,斜界面倾角增大。由于壁面法向的约束,在壁面处产生壁面涡(Wall Vortex)。

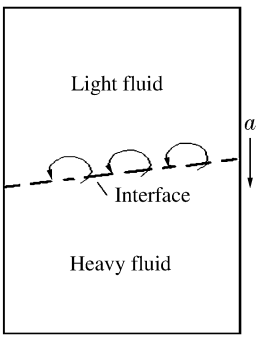


图 4　涡结构示意图

Fig. 4　Sketch of vortex

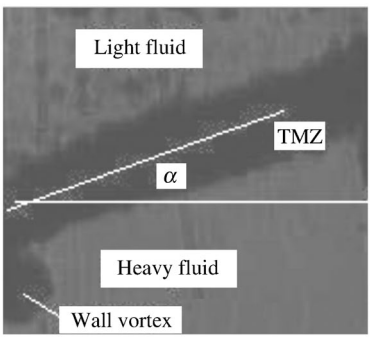


图 5　阴影图

Fig. 5　The schlieren image

为研究混合区内流体间混入量之间的关系,设定 $ZnCl_2$ 溶液初始面积为 S_0(已知量),某时刻未混区域的面积为 S_t,由此可得混入的面积 $\Delta S = S_0 - S_t$,混合区的面积为 S_{TMZ},由此可得轻流体与重流体间的混合比 $\psi = (S_{TMZ} - \Delta S)/\Delta S$。图像中的面积由所占的像素点确定。图 7 为实验所得混合比 ψ 随时

间的变化图。可见混合比 ψ 具有一定的随机性，其值均大于 1，即混合区轻流体的体积混入面积大于重流体。但轻流体与重流体的混入质量比 $\psi/\eta<1.65/2.39=0.69$，即混合区内轻流体的混入质量小于重流体。如图 5 所示，定义混合区与箱体底面的夹角（即倾角）为 α。由图 8 可见，α 随时间是渐增的。

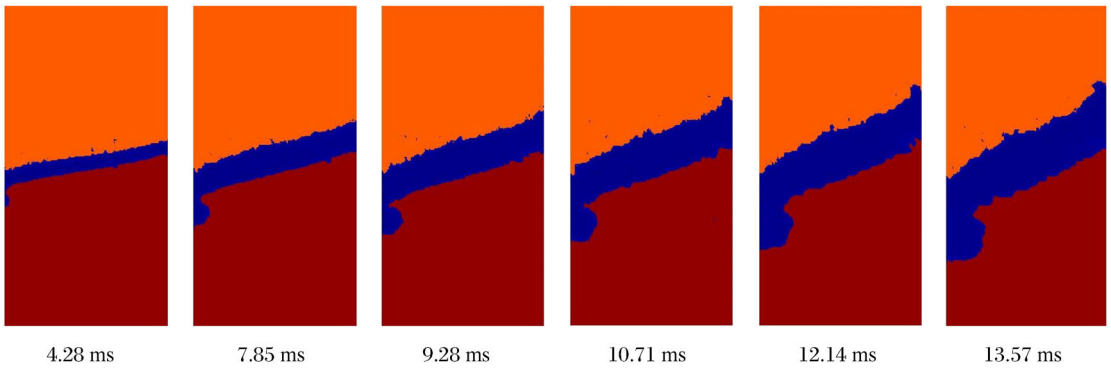


图 6 TMZ 发展实验图像

Fig. 6 Experimental results of TMZ evolution

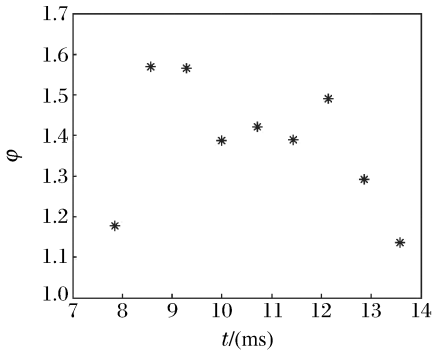


图 7 混合比 ψ 实验结果

Fig. 7 The results of mixing proportion ψ

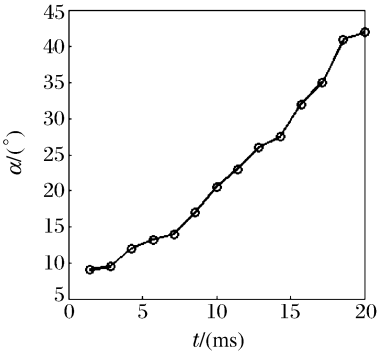


图 8 TMZ 倾角演化图

Fig. 8 The evolution of obliquity of TMZ

本实验所得的斜界面 R-T 不稳定性发展特征，不像正弦初始扰动下 R-T 不稳定性经过线性增长，非线性阶段重流体发展成“尖钉”，轻流体发展成“气泡”，后期“尖钉”翻转成“蘑菇头”形状，直至湍流混合 3 个阶段；由于斜压作用，界面处两流体的速度不同，诱发 Kelvin-Helmoltz(K-H)不稳定性（界面就是涡层），K-H 不稳定和 R-T 不稳定相互耦合，使得斜界面混合过程更加复杂。K-H 不稳定性产生的涡层、R-T 不稳定性致使流体的“下沉”和“上浮”，使得两种流体在界面处相互渗透、混合，两种不稳定性致使混合区界面法向变宽，倾斜角度渐增（界面整体发生翻转）。

4 结 论

利用高压气体驱动方式，对较为复杂的斜界面 R-T 不稳定性物质间混合的特征进行了实验研究。利用阴影测试得出混合区物质间的混合不对称性，混合区内轻流体的混入面积大于重流体，而混入质量小于重流体。轻重流体间混合面积比具有一定的随机性，还需开展较多的实验，以对混合面积比的规律性进行研究。阴影测试可以清晰地显示混合区的外形特征，但对混合区的涡结构却无能为力，需要借助脉冲激光片对流场截面混合区涡结构的演化进行测试，利用 PIV 定量研究混合区的涡结构，这类实验将在后续工作中开展。混合区的发展特征同流体密度比 η、初始倾斜角度的关系还需进一步的研究。

References:

[1] Мешков Е Е. Исследования Гидродинамических Неустойчивостей в Лабораторных Экспериментах [M]. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ",2006:3-5. (in Russia)

[2] Atzeni S, Meyer-ter-Vehn J. The Physics of Inertial Fusion [M]. Translated by Shen B F. Beijing: Science Press, 2008:198-253. (in Chinese)
Atzeni S, Meyer-ter-Vehn J. 惯性聚变物理 [M]. 沈百飞,译. 北京:科学出版社,2008:198-253.

[3] Read K I. Experimental investigation of turbulent mixing by Rayleigh-Taylor instability [J]. Physica D, 1984, 45(12):45-58.

[4] Kucherenko Y A, Balabin S I, Ardashova R I, et al. Experimental study of the influence of the stabilizing properties of transitional layers on the turbulent mixing evolution [A]//IWPCTM8 [C]. Pasadena, 2002:37-38.

[5] Dimonte G, Ramaprabhu P, Andrews M. Rayleigh-Taylor instability with complex acceleration history [J]. Phys Rev E, 2007, 76(4):1-6.

[6] Dalziel S B, Linden P F, Youngs D L. Self-similarity and internal structure of turbulence induced by Rayleigh-Taylor instability [J]. J Fluid Mech, 1999, 399(1):1-48.

[7] Holford J M, Dalziel S B, Youngs D L. Rayleigh-Taylor instability at a tilted interface in laboratory experiments and numerical simulations [J]. Laser and Particle Beams, 2003, 21(3):419-423.

[8] Невмержицкий Н В, Разин А Н, Сотсков Е А. Развитие турбулентного перемешивания на границе газ-жидкость при изменении числа атвуда от +0.9 до −0.2 [A]//Ⅸ Забабахинские Научные Чтения [C]. Снежинск, 2007:45-46. (in Russia)

[9] Dimone G, Youngs D L, Dimits A. A comparative study of the turbulent Rayleigh-Taylor instability using high-resolution three-dimensional numerical simulations: The alpha-group collaboration [J]. Phys Fluids, 2004, 16(5):1668-1690.

[10] Olson D H, Jacobs J W. Experimental study of Rayleigh-Taylor instability with a complex initial perturbation [J]. Phys Fluids, 2009, 21(3):1-13.

[11] Xie Z T, Li J C, Wang L L. Large eddy simulation of R-T instability and turbulent mixing [J]. Chinese Journal of Computation Physics, 2002, 19(2):108-114. (in Chinese)
谢正桐,李家春,王丽丽. R-T 界面不稳定性及湍流混合的大涡模拟 [J]. 计算物理,2002,19(2):108-114.

[12] Bai J S, Li P, Tan D W, et al. Numerical study of the interface instability experiment [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007, 39(6):741-748. (in Chinese)
柏劲松,李　平,谭多望,等. 界面不稳定性实验的数值模拟研究 [J]. 力学学报,2007,39(6):741-748.

[13] Bai J S, Li P, Zou L Y, et al. Two-dimensional simulation of the mixing induced by interface instabilities [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008, 40(4):464-472. (in Chinese)
柏劲松,李　平,邹立勇,等. 界面不稳定性引起混合过程的二维数值模拟 [J]. 力学学报,2008,40(4):464-472.

[14] Shi H H, Kishimoto M. Fluid mechanics in the transient acceleration of a liquid column [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(5):291-397. (in Chinese)
施红辉,岸本熏实. 瞬态加速液柱的流体力学问题研究 [J]. 爆炸与冲击,2003,23(5):291-397.

[15] Shi H H, Zhuo Q W. Evolution of the fluid mixing zone in richtmyer-meshkov instability at a gas/liquid interface [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007, 39(3):417-421. (in Chinese)
施红辉,卓启威. Richtmyer-Meshkov 不稳定性流体混合区发展的实验研究 [J]. 力学学报,2007,39(3):417-421.

[16] Huang W B, Zou L Y, Liu J H, et al. Effects of initial perturbations on Rayleigh-Taylor instability growth at gas-liquid interface [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2010, 24(3):39-41. (in Chinese)
黄文斌,邹立勇,刘金宏,等. 初始扰动对于气液界面 Rayleigh-Taylor 不稳定性发展的影响 [J]. 实验流体力学,2010,24(3):39-41.

[17] Yuan Y T, Liao W Y, Ding Y K, et al. Preliminary experimental study of Rayleigh-Taylor instability of surface perturbation target [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(5):781-783. (in Chinese)
袁永腾,廖文勇,丁永坤,等. 平面调制靶瑞利-泰勒不稳定性初步研究 [J]. 强激光与粒子束,2007,19(5):781-783.

Experimental Investigation of Mixing at Tilted Interface Induced by Rayleigh-Taylor Instability

LIU Jin-Hong, TAN Duo-Wang, ZHANG Xu,
HUANG Wen-Bin, ZOU Li-Yong

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Experiments were performed to investigate dissymmetry of Rayleigh-Taylor(R-T) instability of immiscible liquid initialized with a oblique initial interface. High pressure gas was used to accelerate a container filled with various liquid, the direction of acceleration from the lighter liquid to the heavy liquid, at the moment the interface is instability. The results of tilted angle 9° interfacial ($ZnCl_2$ solution/Hexane) evolution and mixing, were obtained from flow visualization experiments by the shadowgraph method. The obtained experimental result indicated that mixing ratio of TMZ is dissymmetry and the interfacial tilted angle is increased.

Key words: Rayleigh-Taylor instability; turbulent mixing zone; shadowgraph method