DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0829-08

激波与椭圆形重气柱相互作用的 PLIF 实验*

黄熙龙,廖深飞,邹立勇,刘金宏,曹仁义
(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,四川 绵阳 621999)

摘要:在水平激波管中,采用平面激光诱发荧光(planar laser-induced fluorescence, PLIF)方法对椭圆形重气柱界面的 Richtmyer-Meshkov 不稳定性进行实验。气柱由 SF_6 混入一定比例的丙酮蒸气构成,环境气体为空气。通过改变椭圆形气柱的长短轴比值,得到了激波马赫数为 1.25 时,3 种初始界面的演化形态。通过相对体积分数标定,得到了界面失稳演化过程中的相对体积分数分布,观察到了激波作用后界面气体聚集、转移、消散等现象。实验结果发现,对于流向轴长与展向轴长之比较大的气柱界面,初始界面产生的涡量更大且分布更广,其界面不稳定性发展得越迅速和剧烈。失稳发展迅速的界面甚至出现涡对碰撞并产生尾部射流结构的现象。初始界面直接决定了失稳发展初期形成的涡对强度和间距,并对后期演化有重要影响。

关键词:Richtmyer-Meshkov 不稳定性;PLIF;体积分数场;气柱;激波管
中图分类号:O357 **国标学科代码**:13025 **文献标志码**:A

在激波作用下,两种不同密度流体的界面将产生 Richtmyer-Meshkov(R-M)不稳定性,界面失稳并发展直至湍流混合。R-M 不稳定性在惯性约束聚变、超新星爆炸产物层化、爆燃转爆轰等问题中均扮演着重要角色,研究 R-M 不稳定性的产生和发展有着重要意义。

自 1969 年 E. E. Meshkov[1] 通过激波管实验验证了 R-M 不稳定性以来,众多学者对激波冲击下流体界面失稳问题进行了广泛而细致的研究。J. Haas 等[2] 采用有膜球形气泡和气柱界面,利用纹影技术观察了涡对结构的形成与分离。随后,J. W. Jacobs[3-4] 利用层流射流生成无膜气柱,对界面演化后期出现的二次不稳定性进行了描述,该方法有效消除了肥皂泡和薄膜破碎后的干扰,在之后的相关实验研究中得到了广泛应用。C. Tomkins 等[5-6] 利用粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)技术分别对圆形单气柱和双气柱的演化形态、速度场进行了诊断,总结归纳出 3 种相互影响模式。S. Kumar 等[7-8] 采用高精度 PLIF 测试技术观察到了因激波汇聚产生的射流结构,得到了 4 种典型的三气柱构型演化形态;T. Si 等[9]、何惠琴等[10] 分别对汇聚激波和反射激波冲击气泡和气柱界面不稳定性开展了实验研究。L. Y. Zou 等[11-12]、邹立勇等[13] 利用高速摄影技术对 7 种单椭圆气柱界面失稳的演化过程进行了观测,并进一步采用 PIV 技术对多种间距的双椭圆气柱构型进行了实验研究,揭示了不同间距下流场的演化模态,对相互干扰效应进行了分析。

得益于高精度测试技术的不断发展,小尺度结构演化特征得以展现[14],高精度数据的获得使研究范围从演化早期延伸到后期二次不稳定性,乃至湍流混合阶段[15]。PLIF 技术不仅具有非常好的流场显示能力,通过对荧光信号的标定还可进一步获得定量的相对体积分数。在更小尺度、更高时空分辨研究需求下,高精度的 PLIF 技术已成为实验研究激波冲击流体界面不稳定性问题的重要测试手段。

由于气柱界面构型简单,界面 R-M 失稳发展具有显著的二维特征,因而易于提炼出具有规律性的结果。采用激波冲击气柱界面是目前研究 R-M 不稳定性最主要的手段之一。本文中拟采用 PLIF 测试技术,研究弱激波冲击下多种单椭圆形 SF_6 气柱界面的失稳演化。通过改变椭圆形气柱的长短轴之比,得到不同形状的初始界面,进而得到具有不同斜压涡量分布的失稳初始状态。由此结合斜压机制,从演化形态、相对体积分数分布和不稳定性增长分析初始界面对失稳演化的影响。

* **收稿日期**:2016-06-29;**修回日期**:2016-10-08
基金项目:国家自然科学基金项目(11172278,11302201,11472253)
第一作者:黄熙龙(1988—),男,硕士,助理研究员,xlhuang@caep.cn。

1 实 验

1.1 PLIF

PLIF 技术具有高分辨、无干扰、可量化等优点，实验中采用丙酮蒸气作为荧光试剂。丙酮蒸气室温下的扩散率(0.104 $cm^2 \cdot s$)与 SF_6 气体的扩散率(0.097 $cm^2 \cdot s$)接近。在波长为 266 nm 的片状激光照射下，丙酮分子受激发出波长约为 400 nm 的荧光，持续 4 ～10 ns。丙酮气体产生荧光的信号强度与激发环境的关系可简要表达为 $F=\alpha\beta\eta_a$，其中 F 为荧光信号强度，α 为常数，β 为与实验条件有关的参数，η_a 为丙酮分子摩尔分数。在等温等压的实验条件下 β 为常数，对于一定强度的激光，荧光信号强度与丙酮分子摩尔分数成线性关系。

1.2 实验装置

为了得到混有丙酮蒸气的 SF_6 气体，将 SF_6 匀速通过置于 25 ℃水浴环境中的丙酮液体，如图 1 所示。由于进气速率和丙酮液体温度保持不变，可认为在单位时间内通过丙酮液体的 SF_6 气体体积不变，同时丙酮液体所挥发出的丙酮蒸气量保持不变，因而出口处得到的混合气体的组分保持不变。在重力作用下，混合气体流经模具后形成椭圆形气柱，如图 2 所示。由于 SF_6 气柱与空气的界面呈弧形，在平面激波冲击下将产生斜压涡，出现 R-M 不稳定性。实验中共研究了长短轴比值(a/b)分别为 1/4、1/1 和 4/1 的 3 种椭圆形气柱。

激波冲击无膜单椭圆形气柱实验在水平激波管中进行，为获取稳定气柱界面，激光平面距气体入口 20 mm。信号接收端采用带有像增强功能的数字化相机(intensified charge-coupled device，ICCD)，镜头前加装窄带滤光片，以提高信噪比。由于实验在空气环境中进行，混入的少量氧气可消除磷光带来的不利影响。实验开始前，在测试段内充满混合气体并在测试平面拍摄荧光图像，用于检测片光强度的均匀性并对实验结果进行修正。

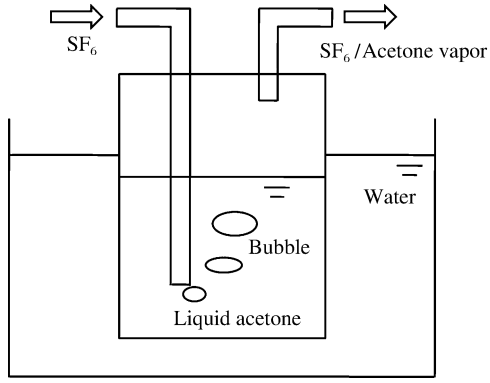

图 1 SF_6 气体与丙酮蒸气的混合

Fig. 1 Mixing of SF_6 and acetone vapor

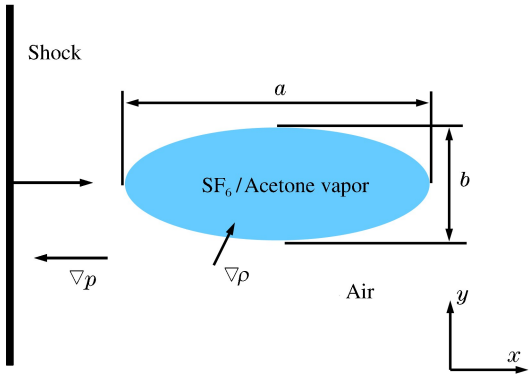

图 2 椭圆形气柱界面

Fig. 2 Interface of elliptic gas cylinder

2 结果与讨论

实验中激波马赫数 $Ma=1.250\pm0.005$，激波由左至右入射到测试段作用于气柱。以激波到达气柱初始位置时为零时刻，分别捕捉 3 种气柱界面在 0.4、0.6 和 0.8 ms 时刻的失稳演化图像。设定圆形界面初始图像中荧光强度最大处体积分数值为 84%[15]，无荧光信号的黑点为 0%，据此对实验图像进行标定，得到气柱界面相对体积分数分布。由于丙酮蒸气对 SF_6 气体有非常好的跟随性，相比于采用乙二醇烟雾作为示踪粒子的高速摄影和 PIV 技术，PLIF 技术在流场显示和定量表征方面具有天然的优势。在激波冲击气柱实验中，同高速摄影[11]相比(如图 3 所示)，PLIF 图像能更好地反映界面内部气体的分布情况，可更精细地显示出流场结构(如涡卷、二次涡、射流等)，其测试结果与数值模拟结果[16]具有更高的吻合度。

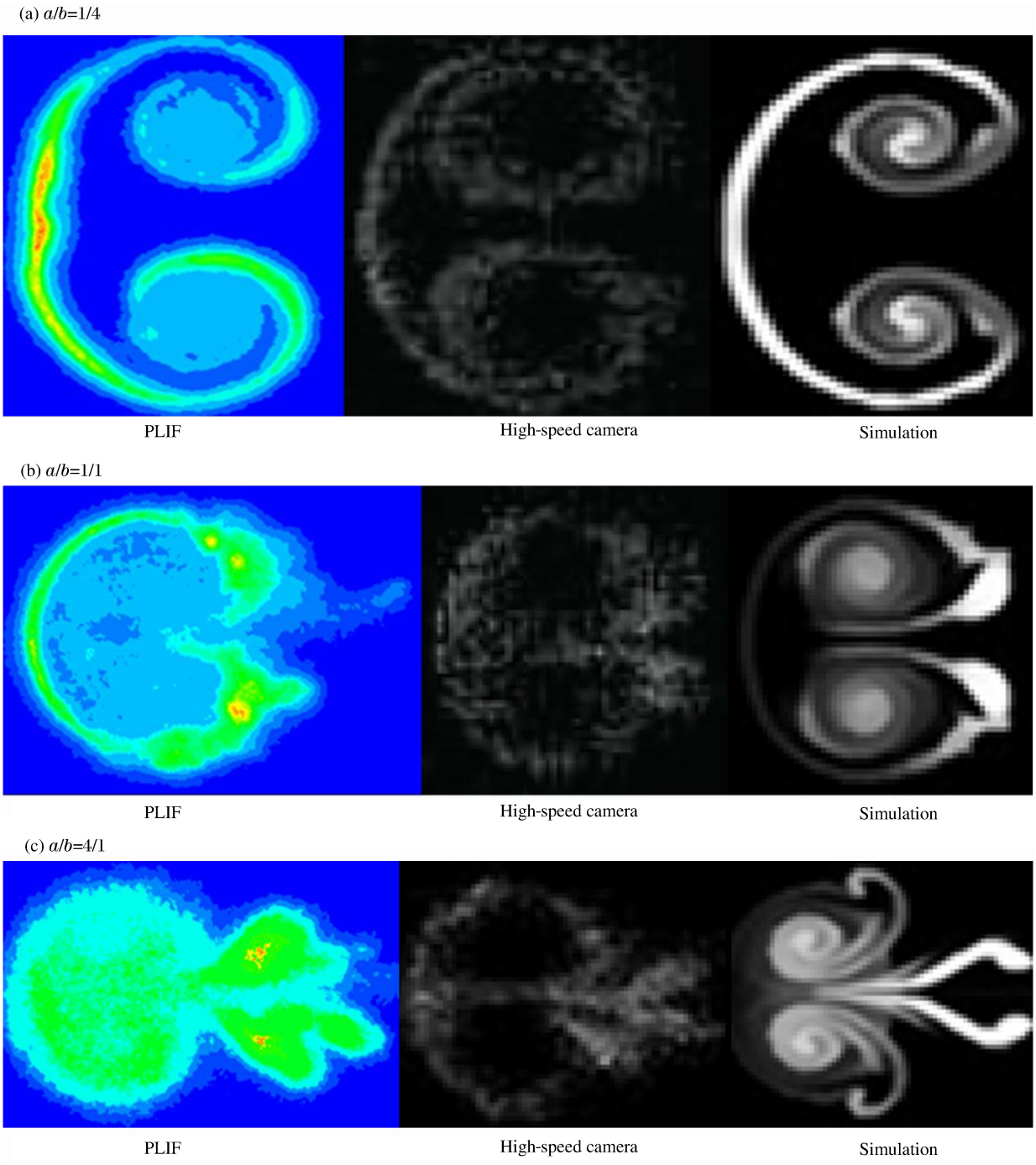

图 3　气柱界面内部气体分布

Fig. 3　Distribution of relative volume fraction in the gas cylinder interface

2.1　斜压机制

针对激波与气柱界面作用的二维物理过程，进行一定的假设、简化，得到如下的涡量方程：

$$\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=-\omega(\nabla\cdot\boldsymbol{v})+\frac{1}{\rho^2}\nabla\rho\times\nabla p+\nu\nabla^2\omega \tag{1}$$

式中：散度项 $-\omega(\nabla\cdot\boldsymbol{v})$ 代表流体质点在流动过程中体积收缩或膨胀导致的涡量的变化；斜压项 $\nabla\rho\times\nabla p/\rho^2$ 代表斜压导致的涡量变化；黏性耗散项 $\nu\nabla^2\omega$ 代表流体黏性引起的涡量变化。激波同气柱界面发生相互作用时，界面上涡量的产生主要由斜压项引起。界面失稳变形过程中，体积的变化将会导致涡量发生一定的变化；进入到演化后期，气体黏性将会对湍流混合起到非常重要的作用。

由斜压项可知，当压力梯度和密度梯度绝对值一定，两者偏差的夹角越大，产生的斜压涡量也就越大。在界面展向上下角区域，压力梯度与密度梯度的夹角接近 90°，产生的涡量最大；在界面流向的两端，压力梯度同密度梯度几乎处于一条直线，产生的涡量最小。随着 a/b 比值增大，展向端部区域范围增大，流向端部区域范围减小，因此界面上产生的涡量更多，如图 4 所示。图 5 所示为沿界面半周长上压力梯度与密度梯度的夹角正弦值 $\sin\theta$，该曲线代表了 3 种初始界面上沿边界所产生的斜压涡量的相对大小和分布，其中横坐标为界面边界的半周长 L。

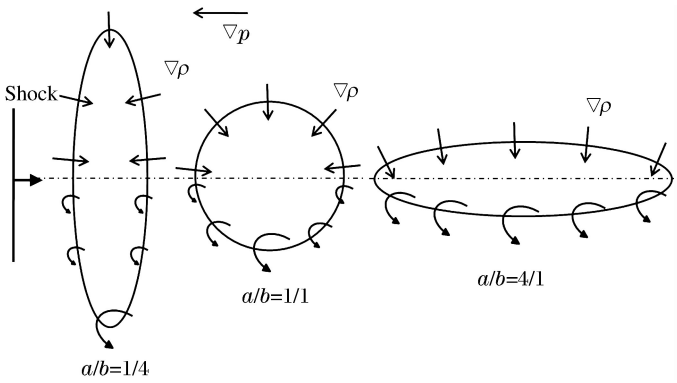

图 4 气柱界面斜压涡分布

Fig. 4 Distribution of baroclinic vortex

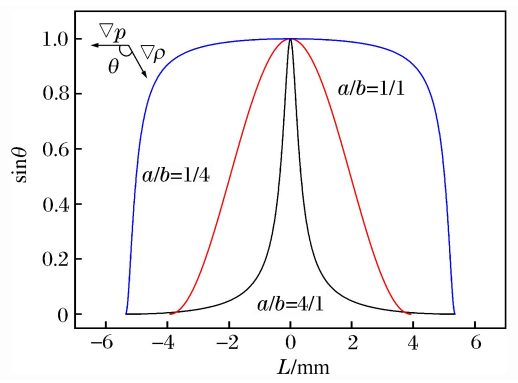

图 5 压力梯度、密度梯度夹角正弦值沿界面半周长的变化

Fig. 5 The change of the sine angle of pressure gradient and density gradient along the half perimeter of the interface

2.2 气体相对体积分数

2.2.1 气体相对体积分数分布

对得到的动态图像进行标定后，得到气柱演化过程中各个时刻的气体相对体积分数分布情况，图 6 所示为 3 种界面失稳演化的瞬时相对体积分数分布。

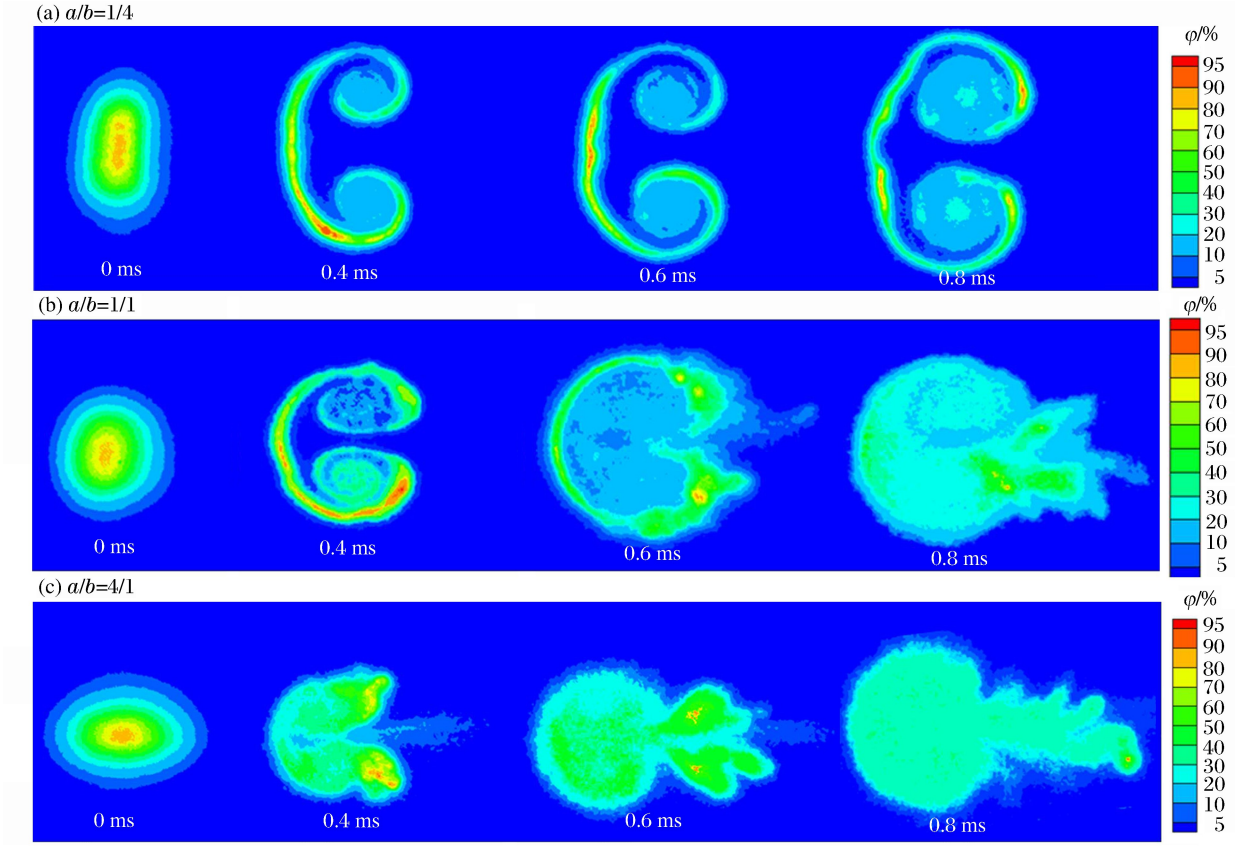

图 6 不同形状界面气体相对体积分数分布

Fig. 6 Distribution of relative volume fraction of gas at different gas cylinder interfaces

由图 6 可以看出，激波作用前，初始界面中心处气体的相对体积分数最大，周围存在明显的扩散层。与理想界面相比，初始界面中较长轴尺寸有所减小，较短轴尺寸增大；圆形气柱各方向尺寸均有所增大。这主要是由于模具出口中较短轴两侧曲率较小，有利于混合气体下落并向外扩散；而较长轴两侧曲率迅速增大，混合气体下落时，部分空气从两端尖角位置进入形成对流，对实验气体在该方向上的扩散发展有一定的阻碍作用。由于初始界面的不同，相同时刻各界面的演化存在较大差异。

对于 $a/b=1/4$ 的椭圆形界面(图 6 (a))，受斜压机制影响，激波作用后在展向界面处形成 2 个大小相同、方向相反的主涡。在主涡对的带动下，界面伸展并向内卷曲形成涡卷，主涡面积不断增大。同时，在主涡间的相互作用下涡距逐渐减小。在激波的压缩作用下，连接主涡对的左界面相对体积分数增大；界面在卷曲伸展过程中相对体积分数减小，气体通过主涡逐渐向下游转移。0.8 ms 时，由于涡卷不断扩大，左界面中心处拉伸变细且相对体积分数减小，出现弱化断开的趋势；主涡右界面处出现气体堆积，局部的相对体积分数增大。此时界面未出现二次不稳定结构。

由于圆形界面(图 6 (b))上生成的斜压涡量增多，在激波作用后 0.4 ms 时，主涡右界面出现相对体积分数集中的现象，且涡对间距较小。受主涡对间相互作用影响，主涡呈鸡蛋形状。随着涡对间距进一步减小，2 个主涡发生接触，气体进一步向下游界面转移，同时出现由 K-H 不稳定性引发的扰动增长(图 6(b)，0.6 ms)。此时 2 个主涡合围在一起，界面相对体积分数主要集中于外轮廓界面，界面内部相对体积分数较低。0.8 ms 时，在主涡对进一步相互挤压下，右界面出现了尾部结构(相对上游而言)。在主涡对右界面相接触的位置，相对体积分数迅速升高；界面内部经过混合，相对体积分数趋于均匀。

相较于前 2 种界面，$a/b=4/1$ 的椭圆形界面(图 6 (c))上斜压涡大量堆积，导致其界面演化显著加快。由于主涡中堆积的涡量大且涡距较小，主涡对之间相互作用更明显。在 0.4 ms 时主涡对已发生接触并出现变形，右界面在相互作用下向两侧分开，界面气体在翘起区域形成堆积，主涡对交界处出现明显的射流结构。0.6 ms 时，下游翘起区域发展呈扇形喷射状，射流结构向下游继续发展。值得一提的是，实验中观测到的该演化特征再现了数值模拟的预测结果[16]。由于二次不稳定性的发展和周围空气的进入，相对体积分数分布趋于均匀，其梯度明显降低。

图 7 所示为圆形界面相对体积分数分别沿展向和流向轴线的分布，展向轴线在 y 方向(参考图 2)上贯穿 2 个主涡的中心，流向轴线在 x 方向位于 2 个主涡之间且平分主涡中心连线。如图 7(a)所示，界面展向范围随着演化时间逐渐增大，沿轴线相对体积分数出现对称的起伏，表现出明显的涡卷特征。与展向不同，流向轴线在演化初期只在上游主涡连接桥处的相对体积分数分布(见图 7(b))表现出明显的各向异性。当主涡相遇后其相对体积分数分布范围迅速扩大，并在 0.8 ms 时刻产生约 5 mm 长的尾部结构，与初始界面直径相当。

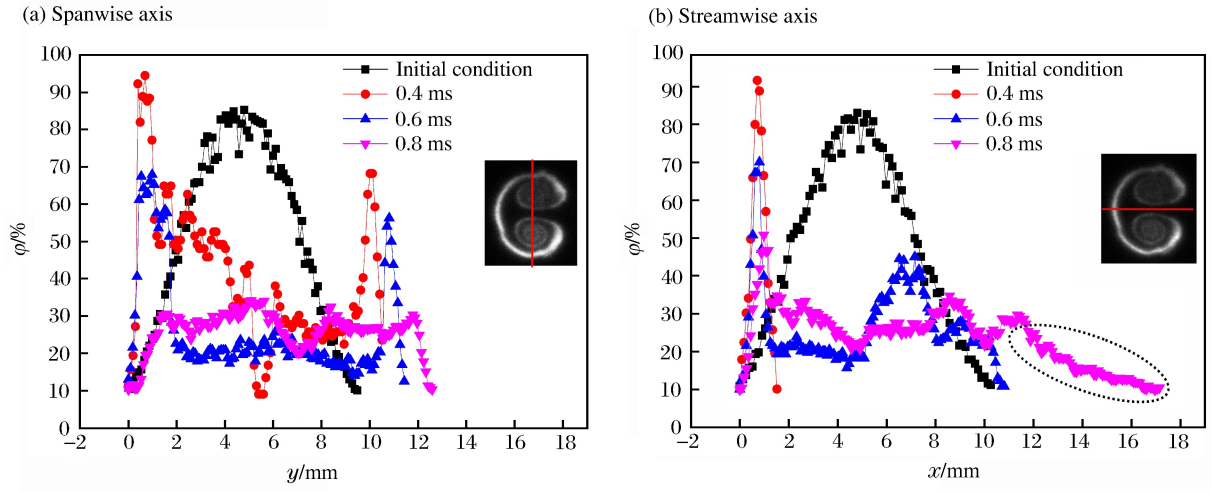

图 7　圆形界面沿轴线的气体相对体积分数分布

Fig. 7　Relative volume fraction of gas along axises of circular interface

0.4 ms 时刻，界面的拉伸发展使界面相对体积分数迅速增大，且展向轴线和流向轴线上相对体积分数峰值基本相同，即涡卷最外层处相对体积分数在各方向上大致相同；失稳演化进一步发展，界面在展向和流向轴线上的平均相对体积分数都有所减小，同时相对体积分大小基本保持一致。

从以上现象可以看出，在斜压机制下，由于气柱初始界面不同，导致主涡的涡量和初始间距不同。在界面演化过程中，主涡对之间的相互作用效果表现出显著的差异。随着 a/b 比值增大，界面上产生更多的斜压涡量且涡对间相互作用更强，使得界面不稳定性演化的驱动增强，加速了不稳定性的发展。

2.2.2 气体相对体积分数概率密度分布

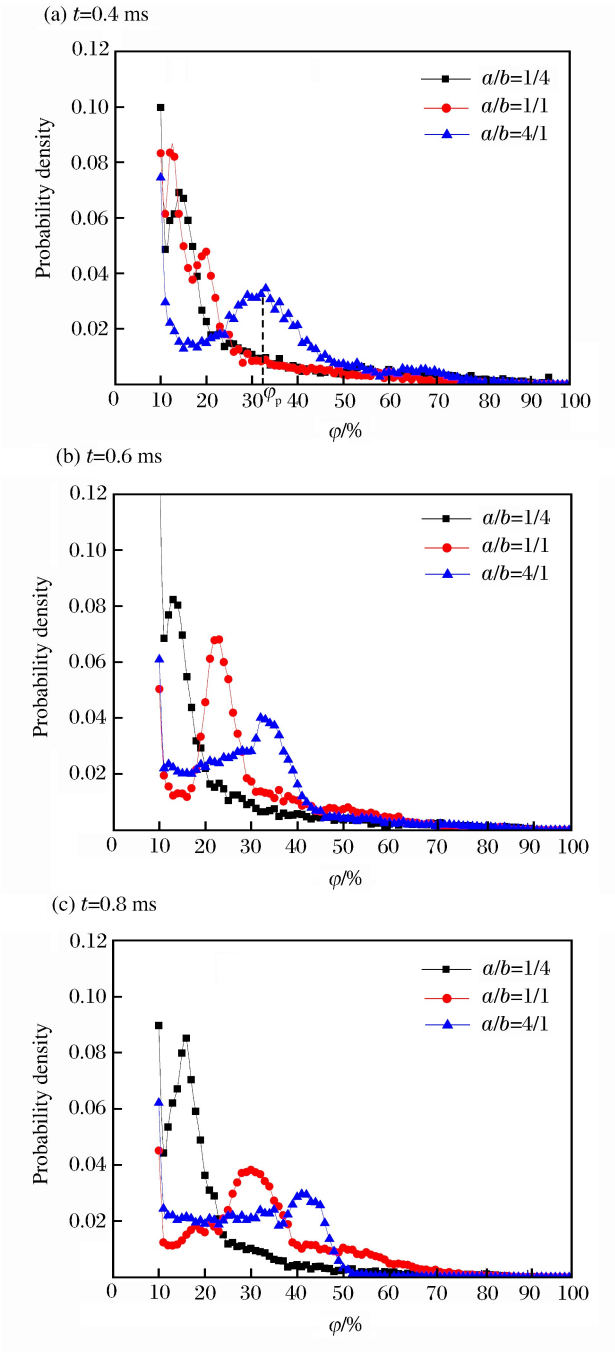

图 8 界面相对体积分数的概率密度分布

Fig. 8 Probability density of interfacial relative volume fraction

对图 5 中情况，将气柱演化界面提取出来（考虑到气体正常扩散的因素，以 10% 为相对体积分数截断值），得到相对体积分数的概率密度分布（相对体积分数间隔为 1%），如图 8(a)～(c)所示。在各演化时刻，3 种界面的概率密度分布曲线均存在 1 个波峰，定义各曲线中波峰所对应的相对体积分数值为该时刻界面的峰值相对体积分数 φ_p，如图 8(a)中横坐标上 φ_p 标注所示。图 9 给出了 3 种界面峰值相对体积分数 φ_p 随时间的变化。

随着演化发展，峰值相对体积分数 φ_p 增大；在相同时刻，a/b 越大，界面的峰值相对体积分数 φ_p 越大。$a/b=1/4$ 的椭圆形界面峰值相对体积分数 φ_p 保持在约 15%，增长幅度很小，主要是由于该界面本身演化较慢，处于失稳混合的较早期阶段。尽管 $a/b=4/1$ 的椭圆形界面演化最快，在考察时间内峰值相对体积分数 φ_p 保持在较高的水平（35% 左右），但 φ_p 的增长幅度却小于演化速度更慢的圆形界面。一方面，$a/b=4/1$ 的椭圆形界面由于失稳演化的快速发展，界面的混合达到相对稳定，相对体积分数的进一步变化减缓。另一方面，界面下游形成的射流结构也在一定程度上阻碍了周围空气进入界面内部，减缓了界面相对体积分数的变化。

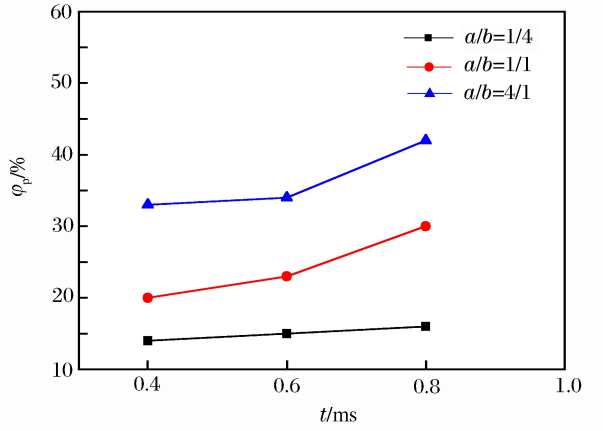

图 9 峰值气体相对体积分数与时间关系

Fig. 9 Relation between of relative volume fraction peak and time

2.3　整体尺度演化

由于 3 种界面在初始形态上具有较大差异，为了更全面地考察初始状态对不稳定性演化的影响，图 10 给出了界面面积的增长情况。其中，a/b 比值较大的界面面积增长速度和幅度均大于 a/b 比值较小的界面，说明激波作用后 a/b 比值较大的界面演化速度更快，在相同时刻不稳定性的发展更充分。SF_6 界面面积的增长，必然导致界面气体相对体积分数的整体下降，在到达后期湍流混合之前，界面已与空气发生了一定程度的混合。由此可见，a/b 比值较大的界面轮廓增长更快，不稳定性演化更迅速，印证了之前相对体积分数演化分析的结论。

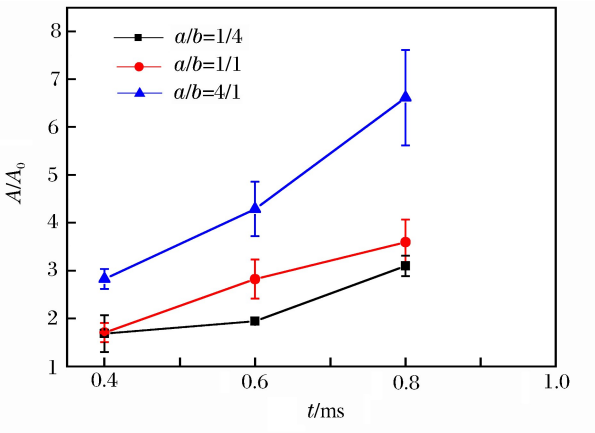

图 10　3 种不同界面相对面积随时间演化

Fig. 10　Time evolution of profile area for different initial conditions

3　结　论

本文中利用高精度 PLIF 技术观察到了界面失稳过程中的拉伸、主涡卷曲增长和尾部射流等现象。分析比较了 3 种界面的演化特征和面积变化的差异，发现流向轴长与展向轴长比值更大的初始界面具有更快速更剧烈的失稳演化，主要因为在斜压机制主导下，流向轴长与展向轴长比值较大的初始界面上斜压涡量更大且分布更广，界面失稳的初始驱动更强。同时，斜压涡量聚集形成的涡对间距更小，涡对间具有更强的相互作用，这对界面的演化形态起到了重要作用。因此，初始界面形状对不稳定性增长的影响不仅表现在界面斜压涡量的分布，同时表现在初始涡距，两者共同决定了之后的演化过程。

参考文献：

[1]　Meshkov E E. Instability of the interface of two gases accelerated by a shock wave[J]. Fluid Dynamics, 1969,4(5):101-104.

[2]　Haas J, Sturtevant B. Interaction of weak shock waves with cylindrical and spherical gas inhomogeneities[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1987,181:41-76.

[3]　Jacobs J W. Shock-induced mixing of a light-gas cylinder[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1992,234:629-649.

[4]　Jacobs J W. The dynamics of shock accelerated light and heavy gas cylinders[J]. Physics of Fluids A, 1993,5(9):2239-2247.

[5]　Tomkins C, Prestridge K, Zoldi C, et al. An investigation of shock-accelerated, unstable gas cylinders using simultaneous density-field visualization and PIV [C]// The 4th International Symposium on Particle Image Velocimetry. Germany, 2001:1136.

[6]　Tomkins C, Prestridge K, Rightley P, et al. Flow morphologies of two shock-accelerated unstable gas cylinders [J]. Journal of Visualization, 2002,5(3):273-283.

[7]　Kumar S, Orlicz G, Tomkins C, et al. Stretching of material lines in shock-accelerated gaseous flows[J]. Physics of Fluids, 2005,17(8):082107.

[8]　Kumar S, Vorobieff P, Orlicz G, et al. Complex flow morphologies in shock-accelerated gaseous flows[J]. Physica D, 2007,235(1):21-28.

[9]　Si T, Zhai Z G, Luo X S. Experimental study of Richtmyer-Meshkov instability in a cylindrical converging shock tube[J]. Laser and Particle Beams, 2014,32(3):343-351.

[10]　何惠琴，翟志刚，司廷，等. 反射激波作用下两种重气柱界面不稳定性实验研究[J]. 实验流体力学，2014,28(6):56-60.
He Huiqin, Zhai Zhigang, Si Ting, et al. Experimental study on the shocked RM instability of two kinds of heavy gas cylinder[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2014,28(6):56-60.

[11]　Zou L Y, Liu C L, Tan D W, et al. On interaction of shock wave with elliptic gas cylinder[J]. Journal of Visual-

ization, 2010,13(4):347-353.

[12] Zou L Y, Huang W B, Liu C L, et al. On the evolution of double shock-accelerated elliptic gas cylinders[J]. Journal of Fluids Engineering, 2014,136(9):031204.

[13] 邹立勇,廖深飞,刘金宏,等. 双椭圆界面 Richtmyer-Meshkov 流动中的相互干扰效应[J]. 高压物理学报,2015,29(3):191-198.
Zou Liyong, Liao Shenfei, Liu Jinhong, et al. Interaction effect of two ellipse Richtmyer-Meshkov flows[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2015,29(3):191-198.

[14] Balakumar B, Orlicz G, Tomkins C. Dependence of growth patterns and mixing width on initial conditions in Richtmyer-Meshkov unstable fluid layers[J]. Physica Scripta, 2008,T132:014013.

[15] Tomkins C, Kumar S, Orlicz G, et al. An experimental investigation of mixing mechanisms in shock-accelerated flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008,611:131-150.

[16] Bai J S, Zou L Y, Wang T, et al. Experimental and numerical study of shock-accelerated elliptic heavy gas cylinders[J]. Physical Review E, 2010,82:056318.

Experiment on interaction of shock and elliptic heavy-gas cylinder by using PLIF

Huang Xilong, Liao Shenfei, Zou Liyong, Liu Jinhong, Cao Renyi

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan*, *China*)

Abstract: An experimental investigation of Richtmyer-Meshkov (R-M) instability in the elliptic heavy gas cylinder was presented in detail. The shock-induced instability was studied in a horizontal shock tube using the planar laser-induced fluorescence (PLIF). The gas cylinder surrounded by air was composed of SF_6 and acetone vapor. By adjusting the ratio of the long axis to the short one in the gas cylinder was achieved the evolution of three types of initial interface accelerated by a Mach 1.25 shock. After the calibration, concentration map were obtained. Furthermore, the congregation, transfer and dissipation in the concentration field was revealed. With a larger aspect ratio, the gas cylinder has a wider deposition of baroclinic vorticity, resulting in a faster evolution. When the evolution is rapid, a jet occurs in the trail structure due to the collision of the vortex pair. It was demonstrated that the initial configuration directly determines the strength and spacing distance of the vortex pair at early times, thereby exerting a significant influence on the instability evolution at later times.

Keywords: Richtmyer-Meshkov instability; PLIF; concentration field; gas cylinder; shock tube

(责任编辑 王易难)