

文章编号: 1001-2486(2009)01-0001-04

激波诱导异质气体界面失稳的数值模拟*

周松柏, 刘君, 郭正, 刘瑜

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 基于二维 N-S 方程, 利用有限差分数值离散方法, 对激波诱导异质气体界面失稳的现象进行了数值模拟, 与文献中实验结果和计算结果进行了定性比较, 并进一步分析了整个流动的非定常动态变化特性和非线性特征。研究表明, 本文数值模拟的非定常流场图谱与文献中的实验结果和数值结果吻合较好; 数值结果捕捉到了六氟化硫界面的演变过程及流场中复杂的波系结构。

关键词: 激波; 异质气体; Richtmyer-Meshkov 不稳定性; 数值模拟

中图分类号: O381 **文献标识码:** A

Numerical Simulation for Shock Induced Interfacial Instabilities of Heterogeneous Gases

ZHOU Song-bai, LIU Jun, GUO Zheng, LIU Yu

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the 2-D Navier-Stokes equations, the shock induced interfacial instabilities of heterogeneous gases was simulated numerically With the finite differential method. After carrying out the comparison between numerical and experimental results, the unsteady and nonlinear characteristics of the flow field was analyzed. From the results, it is observed that the unsteady flow field of numerical simulation is similar to referenced experimentation and CFD results, and the evolvement of sulphur hexafluoride interface and the complicated wave structures are captured from simulation.

Key words: shock; heterogeneous gases; Richtmyer-Meshkov instability; numerical simulation

近年来, Holder 和 Barton^[1] 针对激波诱导异质气体界面失稳的现象进行了一系列的实验研究工作, 国外类似的实验研究工作还可参考文献[2]。这种失稳现象本质上属于 Richtmyer-Meshkov (RM) 不稳定性, 即两种密度不同的流体介质起初彼此分离但存在水平交界面, 且轻流体介质位于重流体介质的上方, 则界面一旦被推动作加速运动(该推动方式往往由激波诱导产生), 该界面即会失去稳定, 且界面上的扰动将会迅速增大, 并最终转化为湍流流态。

对此类实验展开数值模拟, 可以检验和验证多组分无反应数值模拟算法的可靠性和稳健性, 因为其间存在丰富的物理现象, 如激波与接触间断、多组分混合、界面扰动的非线性传播等, 而这些现象的准确模拟对离散格式的要求很高。基于此, Holder 和 Barton 在其实验开展之后即利用 CFD 软件 TURMOIL 3D 进行了模拟, 并和实验做了对比。Thornber^[3] 也利用自己开发的 CFD 软件 CNS3D 对 Holder 和 Barton 的实验进行了高分辨率的数值仿真, 并与实验结果做了细致对比和分析。国内对特定的 RM 不稳定性问题也展开了数值模拟研究工作^[4-5], 但对 Holder 和 Barton 的实验尚没有进行相关研究。

总体而言, Holder 和 Barton 采用的是大涡模拟(LES: Large Eddy Simulation)的方法进行数值计算, Thornber 采用的是隐式大涡模拟(ILES: Implicit Large Eddy Simulation)的方法, 他们开展的均是三维计算, 虽然结果与实验基本吻合, 但其软件编制复杂、计算周期长, 软件工程化更多依赖于软件是否具备并行计算的功能。本文则简化研究过程, 不考虑湍流特征, 直接从二维可压缩流的 N-S 方程出发, 采用有限差分法, 针对 Holder 和 Barton 的实验展开数值模拟, 并与实验结果进行了对比。

* 收稿日期: 2008-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90505003; 10602064)

作者简介: 周松柏(1980-), 男, 博士生。

1 控制方程和计算方法

针对文献[1]给出的实验过程(详细实验模型及相关参数参见下文),本文侧重于仿真其中激波诱导两种轻重异质气体(空气和SF₆)界面失稳的现象,而不考虑长期的湍流混合过程,并考虑到该实验二维特征明显,故数值模拟采用的流动控制方程组为考虑了组分扩散的双组元二维N-S方程组,其笛卡尔坐标系O-xy平面中的表达式为:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(F + F_v)}{\partial x} + \frac{\partial(G + G_v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

其中, $U = (\rho, \rho u, \rho v, e, \rho_1)^T$; F, G 为对流项通量; F_v, G_v 为扩散项通量。 $e = 0.5\rho(u^2 + v^2) + e_1 + e_2$, $\rho_1 + \rho_2 = \rho$, ρ_i 和 e_i 分别为第 i ($i = 1, 2$) 组分的密度和内能, ρ 和 e 分别为单位体积流体微团的总密度和总能量, u, v 为速度分量。层流粘性系数 μ 采用 Sutherland 公式, 分子扩散系数 D_i 采用 $D_i = \mu / (\rho Sc_i)$ 近似, 以提高计算效率, 其中 Sc_i 为施密特数。封闭方程组时补充了基于道尔顿分压定律和完全气体假设的状态方程:

$$p = p_1 + p_2 = \rho_1 R_1 T + \rho_2 R_2 T \quad (2)$$

其中, R_i 为组分气体常数, T 为温度。另外, $e_i = R_i T / (\gamma_i - 1)$, γ_i 是第 i 组分的比热比。

数值模拟过程中为了准确描述边界几何外形, 通常采用贴体网格坐标系, 因此需要将笛卡尔坐标系 (t, x, y) 下的(1)式变换到任意坐标系 (τ, ξ, η) 下。数值离散过程中, 空间离散时采用 Toro^[6] 的具有二阶精度的 WAF 离散格式来扫描两个坐标方向, 其中网格界面通量的求解采用了 HLLC 型 Riemann 近似求解器, 且组分处理方式与总密度 ρ 的处理方法一致; 时间离散时采用三阶 TVD 型 Runge-Kutta 方法^[7]。

2 实验模型及其数值模拟情况

2.1 实验模型及相关参数

Holder 和 Barton 开展的激波诱导重密度气体块产生 Richtmyer-Meshkov 不稳定性现象的实验过程如图 1 所示, 以 SF₆ 作为重密度气体介质, 在激波管实验段内预置 SF₆ 块, 该块中置有橄榄油气溶胶, 故实验照片的亮度即可指代 SF₆ 在特定位置的密度, 且侧面用隔膜保持其形状(该薄膜易被激波破坏, 并且利于实验拍摄), 右侧薄膜高 100mm, 左侧薄膜略高, 而上端未采用薄膜, 使得该预置块中多余介质溢出并从泄流孔排走, 以确保 SF₆ 块高度为 100mm。高压空气(其超压为 70kPa)以理想激波马赫数 1.26 向右传播, 与预置的 SF₆ 块相互作用, 并对其进行拍摄。整个实验过程中, 泄流孔保持打开状态。

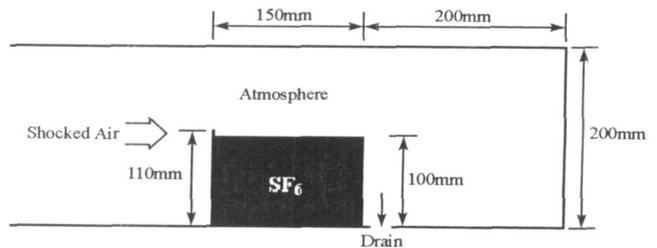


图 1 实验模型

Fig. 1 Experimental model

基于实验工况, 本文展开模拟的相关参数为: (1) 环境静止空气: 比热比 1.4, 静压 100kPa, 密度 1.153kg/m^3 ; (2) 进口高压空气: 静压 170kPa, 激波马赫数 1.26, 密度和温度根据运动激波关系式的波后值给定; (3) SF₆: 比热比 1.076, 密度 6.34kg/m^3 。

2.2 数值模拟网格及初边值条件

在 O-xy 平面内选择计算区域进行网格离散, 其中坐标原点 O 位于初始 SF₆ 块与空气交界面的左下角, Ox 沿着激波运动方向(长度方向), Oy 沿着垂直方向(高度方向)。为了保证准确模拟激波与 SF₆ 块左界面的相互作用, 整个计算区域的选择为 $\{(x, y) | (x, y) \in [-150\text{mm}, 350\text{mm}] \times [0\text{mm}, 200\text{mm}]\}$ 。网格离散点数对应为 $612 \times 299 = 182\,988$, 其中初始 SF₆ 块位置的网格离散为 $200 \times 150 = 30\,000$, 泄流孔处边上的网格点数为 11。

数值模拟时, 给定的初值条件与实验工况的初始状态一致; 本文给定的边值条件有进口条件、滑移壁面条件、出口条件。边值条件各自的处理方法为: 进口条件直接给定运动激波的波后参数; 滑移壁面条件按照 $\partial V/\partial n = 0$, $\partial T/\partial n = 0$, $\partial p/\partial n = 0$ 给定; 泄流孔处给定出口条件, 其参数直接采用计算域中相邻排网格的值。

2.3 结果与分析

为便于统一分析, 令进口激波刚好运动至初始 SF_6 块与空气交界面左边的时刻为 0 时刻。

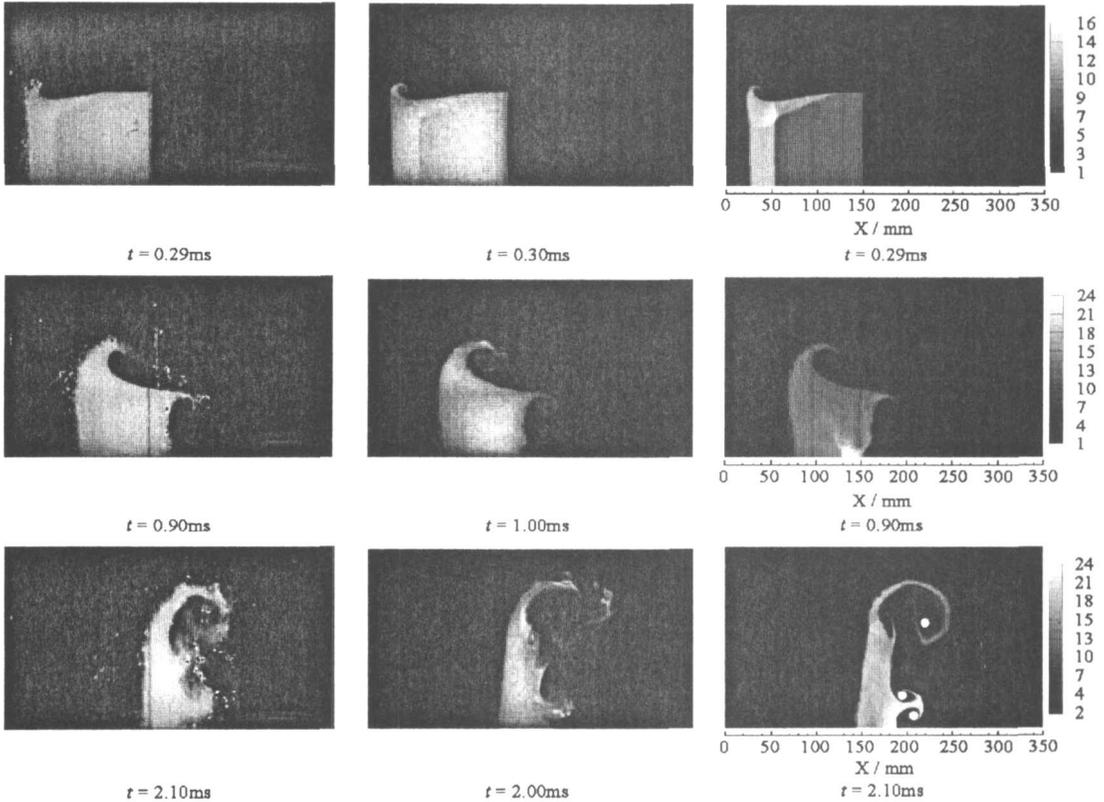


图2 本文计算结果与文献[1]中的实验和计算结果对比图示

Fig. 2 Schematic of comparison with reference[1]

图2为本文计算结果与文献[1]中的实验和计算结果的对比图示, 其中左起第一列、第二列分别为文献中的实验和计算结果, 第三列为本文计算结果(密度云图, 单位: kg/m^3), 所有图示中的垂直参考线均位于 $x = 150\text{mm}$ 处, 且本文计算结果图示中的白点为流场中涡核的位置。从该图可以看出, 本文计算结果与实验定性吻合, 和该文献的计算结果一致性较好。进一步分析其间存在的差异性: 由于实验介质中含有气溶胶, 直接影响到 SF_6 块的物性参数及其均匀性, 进而影响其界面演变的区域大小, 因此总体而言, 实验照片显示的高密度区域略大于计算结果, 且 SF_6 运动边界并不光滑, 结构并不清晰; 计算结果与文献对比可以发现, 本文得到的 SF_6 运动边界更光滑, 结构更清晰。基于以上三个不同时刻流动图片的细致对比, 本文的多组分无反应数值模拟算法的可靠性得到了验证。

图3给出了数值模拟得到的对应于 $t = 0.09, 0.21, 0.29, 0.37, 0.60, 0.90, 2.10, 2.90, 3.70\text{ms}$ 时刻的温度等值线云图。从该图可以看出在前4ms, 整个流动呈现出了以下的特点: 起初 SF_6 块左上角有激波诱导产生的涡卷起, 且不断发展, 但该涡的演变速度小于进口激波的运动速度, SF_6 块内产生折线激波, 并且与卷起的涡作用, 形成多束激波分支, 并与折线激波一起在 SF_6 块内汇聚; 在 $t = 0.37\text{ms}$ 时, SF_6 块内折线激波运动至当前块 $1/3$ 位置处 ($x = 69\text{mm}$), 该折线激波刚好与 SF_6 块外激波相交于 SF_6 块的右上角; 接着, SF_6 块外激波在 SF_6 块右端绕射, 并诱导出新的涡卷起, SF_6 块内的激波分叉现象更加明显; 在

$t = 0.90\text{ms}$ 时, SF_6 块内交叉激波逐渐汇聚于该块右下角, 且块外高速气流在 SF_6 块右端和上端绕射形成的绕射激波与下侧和右侧壁面作用而反射; 在 $t = 2.10\text{ms}$ 时, 反射激波作用于 SF_6 块并穿过它, 由此彻底改变了 SF_6 块的形状, 并在 SF_6 块右下方诱导出一蘑菇型的漩涡, 同时, 上端的主导涡更不稳定, 该主导涡的涡核区域混合程度很高; 随着时间的进一步发展, SF_6 块右下方的蘑菇型漩涡向右上运动, 并逐渐变大, 而上端主导涡区域的 SF_6 块与上壁面作用, 形成更加紊乱的流动结构。综合以上分析, 简单小结该流动的基本特点: 整个流动非定常特性明显, 非线性特征显著, 激波系、漩涡相互干扰诱导出了失稳现象。

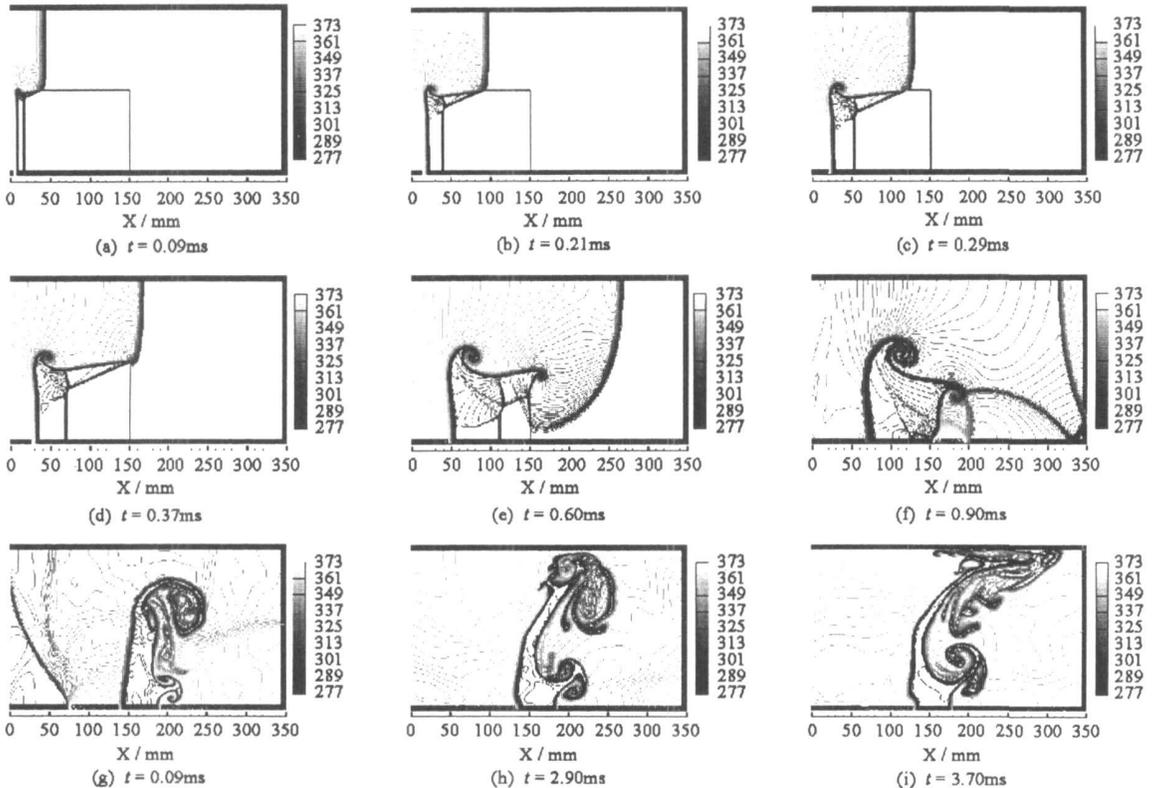


图3 数值模拟温度等值线图

Fig. 3 Contours of temperature for numerical simulation

3 结论

(1) 得到了反映激波诱导异质气体界面失稳现象的详尽流场, 捕捉到了 SF_6 界面的演变过程及流场中复杂的波系结构, 并与文献中的实验结果和数值结果比对, 定性吻合较好。

(2) 本文考虑的激波诱导异质气体界面失稳问题: $t \approx 2\text{ms}$ 为关键时间点, 该时刻以前属于 SF_6 块逐步演变阶段, 该时刻之后 SF_6 块形状则发生根本性的变化; 激波系、漩涡相互干扰是诱导出失稳现象的根本原因。

参考文献:

- [1] Holder D A, Barton C J. Shock Tube Richtmyer-Meshkov Experiments: Inverse Chevron and Half Height [C]// Proceedings of the 9th IWPCFM, 2004.
- [2] Puranik P B, Oakley J G, Anderson M H, et al. Experimental Study of the Richtmyer-Meshkov Instability Induced by a Mach 3 Shock Wave [J]. Shock Waves, 2004, 13(6): 413- 429.
- [3] Thomber B, Drikakis D, Youngs D. Large-eddy Simulation of Multi-component Compressible Turbulent Flows Using High Resolution Methods [C]// Conference on Turbulence and Interactions TI2006, Porquerolles, France, 2006.
- [4] 马东军, 何兴, 孙德军, 等. 柱状交界面 Richtmyer-Meshkov 不稳定性的数值研究 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(5): 398- 404.
- [5] Tian B L, Fu D X, Ma Y W. Numerical Investigation of Richtmyer-Meshkov Instability Driven by Cylindrical Shocks [J]. Acta. Mech. Sinica, 2006, 22(1): 9- 16.
- [6] Toro E F. Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics [M]. Germany: Springer-verlag, 1999.
- [7] Gottlieb S, Shu C W. Total Variation Diminishing Runge-Kutta Schemes [J]. Math. Comput., 1998, 67(221): 73- 85.