激波与物质界面相互作用的数值模拟

张 斌 刘 宇 王 革

(北京航空航天大学 宇航学院，北京 100191) (哈尔滨工程大学 航天工程系，哈尔滨 150001)

摘 要：计算激波与物质界面相互作用问题的关键是精确捕获运动物质界面. 采用 level set 捕获物质界面，用改进虚拟流(modified ghost fluid method)方法定义虚拟流节点参数，从而将多介质流问题分解成多个单一介质流问题求解. 应用该方法对激波与物质界面相互作用系列问题进行了数值模拟，并给出了物质界面的演化过程. 计算结果发现激波强度、物质界面对涡的形式有很大影响，界面两边的密度比决定了界面是否反转.

关 键 词：euler 方程；level set 方法；改进虚拟流；激波；richtmyer-meshkov 不稳定性

中图分类号：O 242

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)10-1220-04

Numerical simulation of shock impact on material interface

Zhang Bin Liu Yu

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Wang Ge

(Department of Aerospace Engineering, Haerbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The key of numerical simulation of the problems of shock impact on interface is capturing accurately the material interfaces. The position of material interfaces were captured by level set, the parameter of ghost points were defined by modified ghost fluid method, accordingly the problem of multi-interfaces was split into several the problems of signal material interface. Based on the methods mentioned above, the numerical simulation of the series problems of shock impact on material interface were presented, and the evolvement of material interfaces were given. It is found that the strength of shock wave and the shape of material interface have great effect to vortex, whether or not the interface reverse depends on the density of two materials.

Key words: euler equations; level set method; modified ghost fluid method; shock; richtmyer-meshkov instability

激波与密度分界面相互作用时，界面将失稳，两种物质将发生湍流混合. 这种不稳定性称为 RM(Richtmyer-Meshkov)不稳定性. RM 不稳定研究在航空航天、爆炸、天体力学等方面有重要的应用. 因此，研究激波与物质界面相互作用有着很重要的意义.

激波与物质界面相互作用的数值模拟研究中最重要的是运动界面的精确捕获. 文献[1]对弱激波作用下的空气-氦(Air-He)以及空气-氟里昂(Air-Freon)界面演变进行了数值模拟. 文献[2]数值模拟强激波与空气-氟里昂(Air-Freon)交界面的相互作用过程. 文献[1－2]对物质界面的捕获不是很理想. 而本文采用的 Level set[3] 结合改进虚拟流[4]方法能十分精确的捕获物质界面. 所以模拟此类问题能得到合理的计算结果. 由于界面的形状、界面两边密度比和激波的强度对物质界面的演化有很大的影响. 本文应用上述方法对不同强度的激波、不同形状的物质界面、不同密度

收稿日期：2008-10-06

作者简介：张 斌(1983－)男，湖南株洲人，博士生，zhangbin.1983@yahoo.com.cn.

比的物质界面进行了数值模拟,对计算结果进行了比较分析.

1　数值方法

1.1　流场控制方程的求解

二维可压缩流的控制方程是 Euler 方程:

$$\left.\begin{aligned}&\boldsymbol{U}_t+\boldsymbol{F}(\boldsymbol{U})_x+\boldsymbol{G}(\boldsymbol{U})_y=0\\&\boldsymbol{U}=(\rho,\rho u,\rho v,E)^{\mathrm{T}}\\&\boldsymbol{F}(\boldsymbol{U})=(\rho u,\rho u^2+p,\rho uv,u(E+p))^{\mathrm{T}}\\&\boldsymbol{G}(\boldsymbol{U})=(\rho v,\rho uv,\rho v^2+p,v(E+p))^{\mathrm{T}}\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

式中,$E=\rho e+\rho(u^2+v^2)/2$,表示单位体积的总能量;ρ,p,e 分别表示密度、压力和单位质量的内能;u,v 分别表示 x,y 方向上的速度. 二维 Euler 方程采用时间分裂法[5]将其分解成两个一维问题. 每个一维问题采用 HLLC[6]格式进行离散求解. 式(1)具体分解如下:

$$S_x=\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t}+\frac{\partial \boldsymbol{F}(\boldsymbol{U})}{\partial x}=0\tag{2}$$

$$S_y=\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t}+\frac{\partial \boldsymbol{G}(\boldsymbol{U})}{\partial y}=0\tag{3}$$

式(2)、式(3)的差分算子形式为

$$\boldsymbol{U}^{n+1}=\boldsymbol{L}_x(\Delta t)\boldsymbol{L}_y(\Delta t)\boldsymbol{U}^n\tag{4}$$

1.2　运动界面控制方程的求解

界面随流体质点一起运动,界面位置的运动方程即 Level Set 方程. 改方程用空间五阶 WENO 格式、时间三阶 TVD-Runge-Kutta 方法[7]求解.

$$\Phi_t+u\cdot\Phi_x+v\cdot\Phi_y=0\tag{5}$$

由于数值方法的内在效应,一般计算进行几个时间步长后,Level Set 函数不再是到界面的距离函数,为了保持 Level Set 函数始终为到界面的符号距离函数,必须对其进行重新初始化. 求初值问题(6)的稳定解,将符号距离函数重新初始化,具体方法见文献[7].

$$\left.\begin{aligned}&\Phi_t-S_\varepsilon(\Phi_0)\left(\sqrt{\Phi_x^2+\Phi_y^2}-1\right)=0\\&\Phi(x,0)=\Phi_0(x)\end{aligned}\right\}\tag{6}$$

1.3　虚拟节点参数设定方法

运动界面附近的虚拟节点参数采用改进虚拟流方法设定. 该方法是利用特征关系和激波跳跃条件,通过迭代的方法求出界面的压力和速度,进而求出界面左右两边的密度和熵,再将熵延拓到其他虚拟节点. 流体 A 在$(i+1)$节点的速度和压力用界面的压力和速度代替,$(i+1)$的熵取界面左边的熵 S_L,而$(i+2)$点的压力和速度值直接采用流体 B 的真实值. 为了削弱"overheating"误差,采用 "Isentropic"修正. 即将 i 点的熵改为 S_L,见图 1.

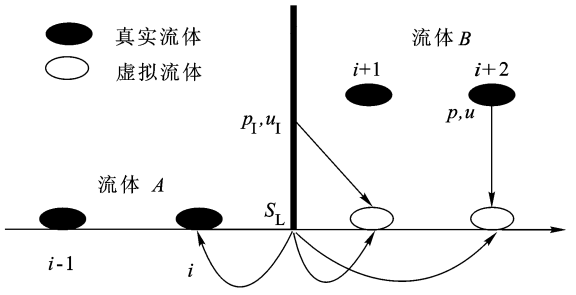
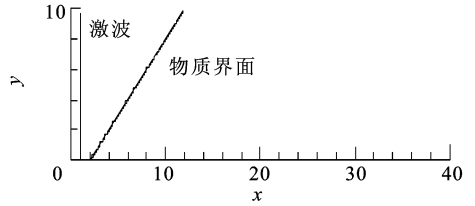


图 1　带熵修正的 Modified Ghost Fluid 方法示意图

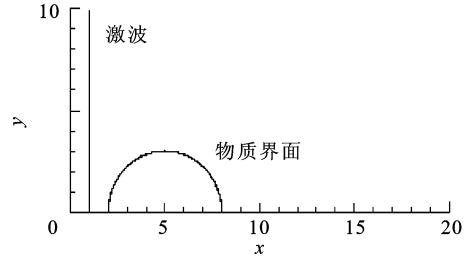
2　数值算例

本节由 4 个算例[8]组成:(弱\强)激波与 Air-He 物质界面作用问题(激波由重气体进入轻气体)、(弱\强)激波与 Air-Freon 物质界面作用问题(激波由轻气体进入重气体). 每个算例考虑两种物质界面类型:斜物质界面和弧型(气泡)物质界面.

激波与物质界面作用的模型见图 2. 激波从左向右运动,波后的参数可以根据正激波关系式给出. 计算区域上下边界为固壁边界条件,左右为流入流出边界条件. 激波与斜物质界面和激波与弧型物质界面算例分别采用 1 000 × 250 和 1 000×500 的网格进行计算.



a　激波和斜物质界面



b　激波和弧型物质界面

图 2　激波和物质界面的初始位置

2.1　弱激波与 Air-He 物质界面

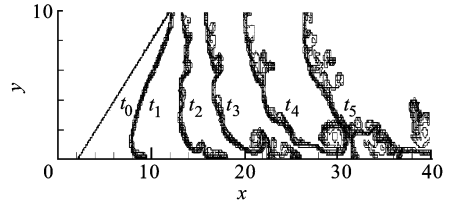
初始条件为:激波马赫数为 1.2.

$$(\rho_A,u_A,v_A,p_A,\gamma_A)=(1.2,0,0,1,1.4)$$

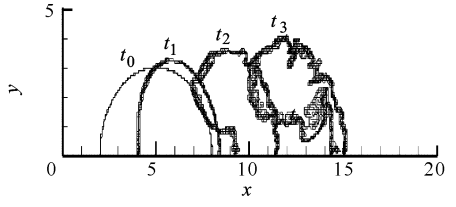
$$(\rho_H,u_H,v_H,p_H,\gamma_H)=(0.167,0,0,1,1.63)$$

图 3 给出了 2 种类型物质界面随时间步的演

化过程. 当激波扫过物质界面后,物质界面弯曲变形. Richtmyer-Meshkov 不稳定性引起物质界面位置转换. 这正是激波由重气体扫过轻气体时的典型特征. 随着物质界面的不断变形,斜物质界面在靠近下壁面处有较明显的涡产生,而界面其他部分则出现了不太明显的小涡. 这些涡随着时间步的推移,涡强度不断扩大,加速了两种物质的混合,见图 3a. 对于弧型界面类型也有相似的情况发生. 弧型界面内靠近下壁面的流体速度相对较快,这使得气泡变形类似于斜物质界面情况下的界面反转. 而且在靠近下壁面处也出现了较明显的涡. 但由于界面形状的不同,气泡拉长现象并不明显,见图 3b.



a 斜物质界面



b 弧型物质界面

图 3 弱激波与 Air-He 物质界面的演化

2.2 强激波与 Air-He 物质界面

初始条件为:激波马赫数为 3.

$(\rho_A, u_A, \nu_A, p_A, \gamma_A) = (1.2, 0, 0, 1, 1.4)$

$(\rho_H, u_H, \nu_H, p_H, \gamma_H) = (0.167, 0, 0, 1, 1.63)$

强激波的作用过程与弱激波比较相似. 当激波与界面作用后,由于 Richtmyer-Meshkov 不稳定性,物质界面发生了变形和反转. 但对于斜物质界面类型,界面在靠近上下壁面处都出现了较明显的涡. 而界面其他部位较为光滑. 随后在这段光滑界面处也产生了较小的涡. 界面拉伸情况较弱激波情况小,见图 4a. 而对于弧型物质界面类型,气泡压缩很明显,在强激波作用下气泡很快被压缩在很小的区域内;出现的涡比弱激波情况下更远离壁面下端,见图 4b.

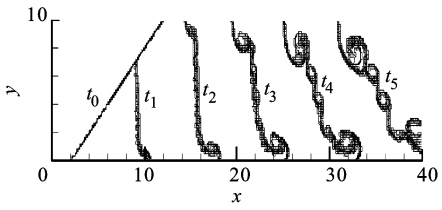
2.3 弱激波与 Air-Freon 物质界面

初始条件为:激波马赫数为 1.2.

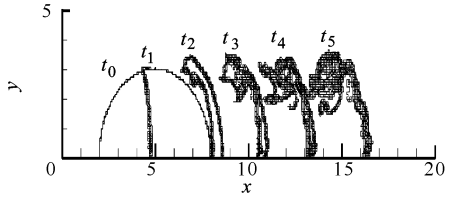
$(\rho_A, u_A, \nu_A, p_A, \gamma_A) = (1, 0, 0, 1, 1.4)$

$(\rho_F, u_F, \nu_F, p_F, \gamma_F) = (3, 0, 0, 1, 1.4)$

由于激波是从轻气体进入重气体,计算结果



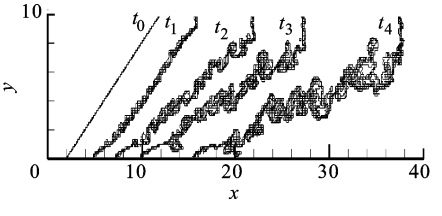
a 斜物质界面



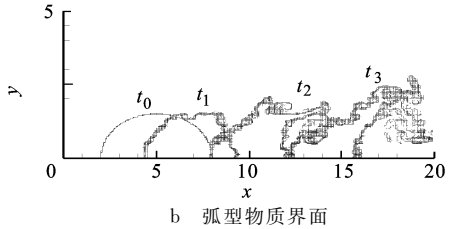
b 弧型物质界面

图 4 强激波与 Air-He 物质界面的演化

较 Air-He 物质界面类型有很大的不同. 对于斜物质界面,界面在激波扫过后并不发生反转,由于靠近上壁面的流体速度较快,界面也被拉长. 界面上下靠近壁面处并没有明显的涡产生,而在界面中间部分出现了一系列的小涡,随后这些小涡继续发展,且出现了涡的并对,见图 5a. 对于弧型界面类型,气泡变形剧烈,气泡界面拉长较明显. 涡出现在气泡的右侧,且离下壁面较远. 由于涡的不断扩大,气泡的一小部分在涡的作用下碎裂,见图 5b.



a 斜物质界面



b 弧型物质界面

图 5 弱激波与 Air-Freon 物质界面的演化

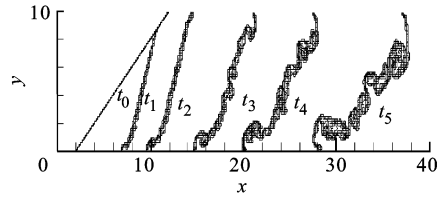
2.4 强激波与 Air-Freon 物质界面

初始条件为:激波马赫数为 10.

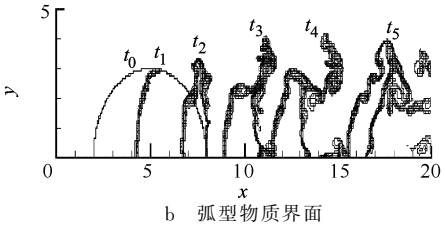
$(\rho_A, u_A, \nu_A, p_A, \gamma_A) = (1, 0, 0, 1, 1.4)$

$(\rho_F, u_F, \nu_F, \rho_F, \gamma_F) = (3, 0, 0, 1, 1.4)$

和弱激波与 Air-Freon 物质界面类型相比较,强激波类型下界面变化情况基本一致. 不同的是斜物质界面上的涡较少,气泡界面变形更剧烈,见图 6.



a　斜物质界面



b　弧型物质界面

图 6　强激波与 Air-Freon 物质界面的演化

3　结　论

本文采用 level set 结合改进虚拟流方法,将多介质流问题分解成多个单一介质流处理. 这类方法不但容易程序实现,而且能很好地捕获复杂流场下的运动物质界面. 应用该方法数值模拟了激波与物质界面作用的系列问题.

从数值模拟的计算结果得出以下结论:

1) 激波强度大,斜物质界面上出现数量较少的大涡,激波强度小则斜物质界面上出现一系列的小涡. 气泡界面随着激波强度增大,变形更剧烈. 涡的并对随着激波强度的增强也会加强.

2) 物质界面的形状不同,涡出现的位置和数量也不同. 斜物质界面和弧形物质界面在界面反转、拉伸方面有相似之处.

3) 物质界面左右密度比决定了界面是否反转. 激波由轻气体进入重气体,物质界面不会发生反转;激波由重气体进入轻气体,物质界面会反转.

参考文献 (References)

[1] Hawley J F, Zabusky N J. Vortex paradigm for shock accelerated density satisfied interfaces[J]. Physical Review Letter, 1989, 63(12): 1241－1244

[2] 严长林,孙得军,尹协远,等. 激波加速的密度分层流体界面的演化[J]. 空气动力学学报, 2001, 19(2): 228－233
Yan Changlin, Sun Dejun, Yin Xieyuan, et al. Evolution of shock-accelerated density-stratified interfaces [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2001, 19(2): 228－233(in Chinese)

[3] Sussman M, Osher P S. A level set approach for computing solution to incompressible two-phase flow[J]. Journal of Computational Physics, 1994, 114: 146－159

[4] Liu T G, Khoo B C, Yeo K S. Ghost fluid method for strong shock impacting on material interface[J]. Journal of Computational Physics, 2003, 190: 651－681

[5] Falcovitz J, Alfandary G, Hanoch G. A two-dimensional conservation laws schemes for compressible flows with moving boundaries [J]. Journal of Computational Physics, 1997, 138: 83－102

[6] Toro E F, Spruce M, Speares W. Restoration of the contact surface in the HLL-Riemann solver [J]. Shock Waves, 1994, 4: 25－34

[7] 刘儒勋,舒其望. 计算流体力学的若干新方法[M]. 北京:科学出版社, 2003
Liu Ruxun, Shu Qiwang. Several new methods of computational fluid dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2003 (in Chinese)

[8] 王晨星,唐维军,程军波. 应用多介质 PPM 方法计算斜激波与物质交界面的相互作用[J]. 计算物理, 2004, 21: 532－527
Wang Chenxing, Tang Weijun, Cheng Junbo. Numerical computations of the refraction of a shock wave at interface by multi－component PPM algorithm[J]. Comput Phys, 2004, 21: 532－527 (in Chinese)

(编　辑:张　嵘)