文章编号：1001-1455(2014)04-0439-05
DOI：10.11883/1001-1455(2014)04-0439-05

水下爆炸柱形高压气泡膨胀过程的 RGFM 和高精度格式数值模拟*

史汝超[1]，张亚军[2]，徐胜利[1]
(1. 中国科学技术大学近代力学系，安徽 合肥 230026；
2. 中国工程物理研究院流体物理研究所，四川 绵阳 621999)

摘要：为了对柱形装药水下爆炸高压气泡膨胀过程进行三维数值模拟，用 level set 方法追踪气水界面，详细描述了精确对柱形气泡进行 level set 建模；对于流场，使用 Euler 方程描述，并用高精度格式(五阶 WENO 和四阶 R-K 法)离散空间项和时间项；对于 level set 方程，使用五阶 HJ-WENO 离散；用 RGFM 处理气水界面附近网格节点。给出了水下流场不同时刻的压力云图、柱形高压气泡的形状演变以及流场中几个指定点的压力峰值。通过三维建模和计算验证，用 RGFM 结合高精度格式可以很好地对柱形高压气泡膨胀问题进行三维数值模拟，同时也可以较精确地追踪高密度比、高压力比的三维气水界面。计算结果表明，柱形高压气泡在膨胀过程中，形状逐渐向椭球形变化；位于固壁附近的柱形高压气泡受固壁反射波的影响，在固壁法线方向上的膨胀会受到抑制；双圆柱形高压气泡膨胀产生的冲击波，可以彼此抑制对方的膨胀。

关键词：爆炸力学；高压气泡膨胀；level set 方法；水下爆炸；高精度格式；虚拟流体方法
中图分类号：O382.1　　**国标学科代码**：1303520　　**文献标志码**：A

柱形高压气泡膨胀问题常见于柱形装药水下爆炸。对此类问题进行数值模拟，精确处理和追踪高压力比、高密度比的气水界面一直是难点。Rayleigh-Plesset 运动方程[1]为众多气泡运动理论研究提供了参考；J. R. Blake 等[2]和 A. Pearson 等[3]采用边界元方法研究了水下爆炸气泡演化过程；T. A. Vernon[4]和 Z. Zong[5]采用拉普拉斯方程描述速度场，研究高压气泡运动。

而对圆柱形高压气泡膨胀问题进行三维高精度数值模拟的文献较少，是因为柱形高压气泡的三维精确建模和数值模拟较复杂。如果使用 level set 重新初始化技术对整个流场的 level set 初值直接进行定义，会造成界面的非物理移动[6]。因此，本文中，对流场的 level set 初值进行分区定义，以实现精确建模，同时用 RGFM(real ghost fluid method)[7]处理气水界面附近网格节点，并结合高精度格式，对柱形高压气泡膨胀问题进行高精度数值模拟。

1　控制方程和数值方法

1.1　Level set 方法

使用 level set 方程[8]追踪气水界面：

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t}+\boldsymbol{v}\cdot\nabla\varphi=0 \tag{1}$$

式中：φ 为距离函数。如图 1 所示，圆柱模型与 z 轴平行。圆柱底面半径为 r，上、下底面中心坐标分别为 (x_0,y_0,z_1) 和 (x_0,y_0,z_2)。设 $s=\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}$，为空间任意点 (x,y,z) 到圆柱中轴线的距离。流场任意点的 level set 初始值 φ 为：

* **收稿日期**：2012-12-10；**修回日期**：2013-04-07
基金项目：国家自然科学基金项目(10902110)
作者简介：史汝超(1982—)，男，博士。

$$\varphi=\begin{cases}\sqrt{(s-r)^2+(z-z_1)^2} & z\geqslant z_1,\quad s>r\\ z-z_1 & z\geqslant z_1,\quad s\leqslant r\\ s-r & z_2\leqslant z\leqslant z_1,\quad s>r\\ -\min(r-s,z_1-z,z-z_2) & z_2\leqslant z\leqslant z_1,\quad s\leqslant r\\ \sqrt{(s-r)^2+(z-z_2)^2} & z\leqslant z_2,\quad s>r\\ z_2-z & z\leqslant z_2,\quad s\leqslant r\end{cases}\tag{2}$$

若柱形气泡倾斜放置，则将坐标系旋转，使柱形气泡中轴线与旋转坐标系的 z 轴平行。因为坐标系旋转不会改变 φ，所以在旋转坐标系中，仍可使用式(2)定义 φ 的初值。对于多爆源，用式(2)分别求解 φ_1、φ_2、…、φ_n。在计算中，每隔一定的时间步，还需要对 φ 重新初始化[9]。

1.2 RGFM

如图 2 所示：(1)先用 ARPS(approximate Riemann problem solver)[10]求解界面参数 p_{I}、u_{I}、ρ_{IL}、ρ_{IR}；(2)将界面参数 p_{I}、u_{I}、ρ_{IL}赋给真实节点 i；(3)将 p_{I}、u_{I}、ρ_{IL}赋给虚拟节点 $i+1$；(4)在虚拟区域中，将节点 $i+1$ 的值沿界面法线方向外推，具体外推方程见文献[11]。在三维计算中，用界面两侧法向偏转角度最小的两个节点代入一维模型求解界面参数。

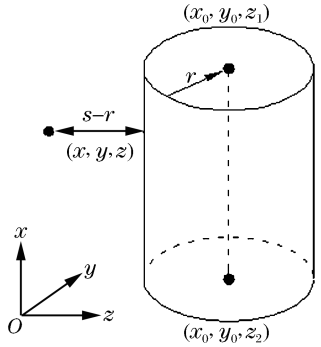

图 1 柱形气泡 φ 初值定义示意图

Fig. 1 Schematics of defining initial φ of cylindrical bubble

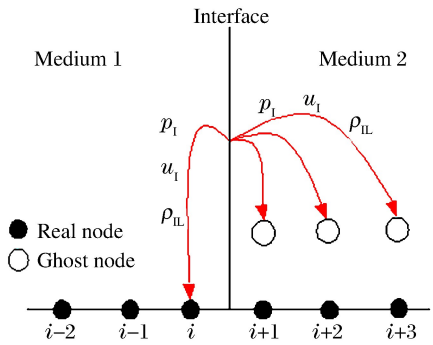

图 2 RGFM 气水界面附近节点赋值示意图

Fig. 2 Schematics of updating the nodes next to interface using RGFM

1.3 控制方程及状态方程

忽略黏性项和重力项，用 Euler 方程描述流场；使用瞬时爆轰模型，描述水下爆炸的高压气体膨胀过程和冲击波传播过程，高压气体的初始密度为装药密度，初始压力为给定值，并用理想气体状态方程描述；对于水，用 Tait 方程[12]描述。

1.4 数值格式

对于 Euler 方程，使用五阶 WENO(weighted essentially non-oscillatory)[13]离散空间项，四阶 R-K 法(Runge-Kutta 法)[14]离散时间项；对于方程(1)，使用 HJ-WENO(Hamilton-Jacobi-WENO)[15]求解。对 RGFM 中的外推方程，使用一阶迎风格式离散。具体求解顺序为：(1)用 RGFM 处理界面附近水的真实区域的网格节点，并将更新后的参数值外推至虚拟区域。由于对控制方程的离散，空间方向是五阶格式，时间方向是四阶格式，所以外推区域取 $12\sqrt{3}\,\Delta x$；(2)用同样的方法处理气体；(3)分别求解水和气体的下个时间步的流场值；(4)用 level set 方法求解下个时间步的界面。

2 计算结果与分析

2.1 算例 1

柱形高压气体的初始参数为：$p_{\mathrm{g}}=21$ GPa，$\rho_{\mathrm{g}}=1.6$ t/m^3，$\gamma_{\mathrm{g}}=3.0$。水的初始参数为：$p_{\mathrm{l}}=0.1$ MPa，$\rho_{\mathrm{l}}=1.0$ t/m^3。如图 3(a)所示，计算区域取$[0,30]\times[0,30]\times[0,30]$。炸药的中心坐标为(15,15,10)。柱形气泡长 10.0，底面直径 6.0，与面 $DCGH$ 呈夹角 45°。边界条件取：计算域底部为无

滑移壁面，其余 5 个面为流出的。网格数量为 121×121×121。由图 4(a)，柱形高压气泡开始膨胀时，首先在水中产生一道激波，同时气泡内部产生一道稀疏波，并向气泡中心传播。由于气泡在底面方向和径向的膨胀，两个底面附近均产生一圈低压区。由图 4(b)，激波到达固壁，并开始反射。由图 4(c)，随着计算时间的推进，反射激波开始打向气泡，抑制气泡膨胀。

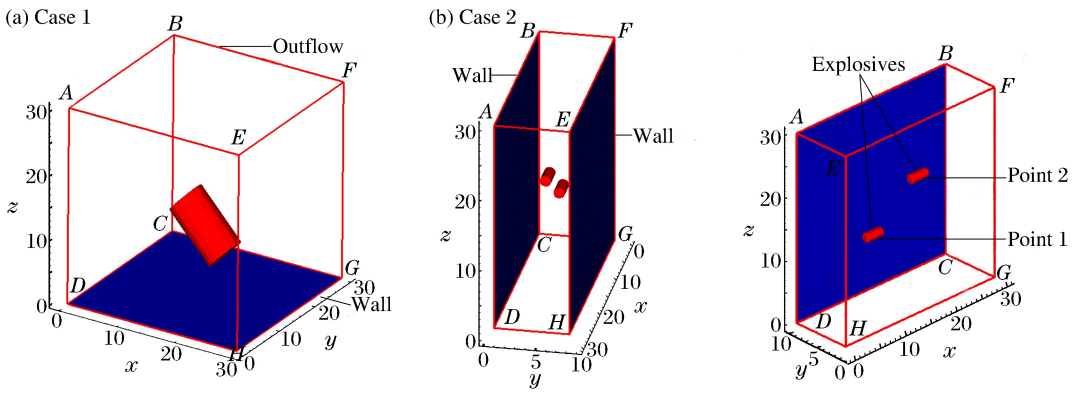

图 3 高压气泡初始位置示意图

Fig. 3 Schematics of initial location of high pressure bubble

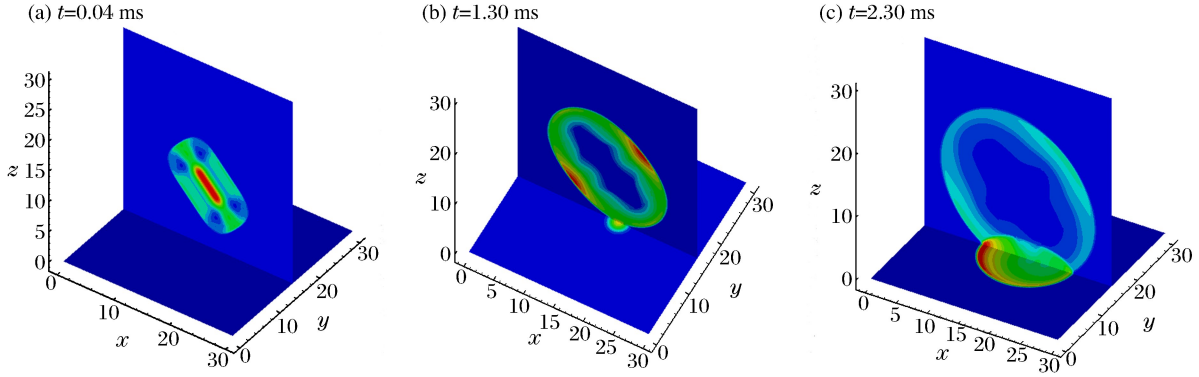

图 4 算例 1 流场压力云图

Fig. 4 Pressure cloud pictures of flow field of case 1

2.2 算例 2

双圆柱形装药，爆炸气体产物的初始参数为：$p_g=21$ GPa，$\rho_g=1.6$ t/m^3，$\gamma_g=3.0$。水的初始参数为：$p_l=0.1$ MPa，$\rho_l=1.0$ t/m^3。如图 3(b)所示，计算域取[0,30]×[0,10]×[0,30]，炸药形状为两个相同尺寸的圆柱体，高 6.0，底面直径 3.0，同计算域底面 *DCGH* 平行。炸药的中心坐标分别为(9,5,12)、(21,5,18)。边界条件取面 *ABCD* 和面 *GHEF* 为无滑移壁面，其余 4 个面为流出的。面 *GHEF*

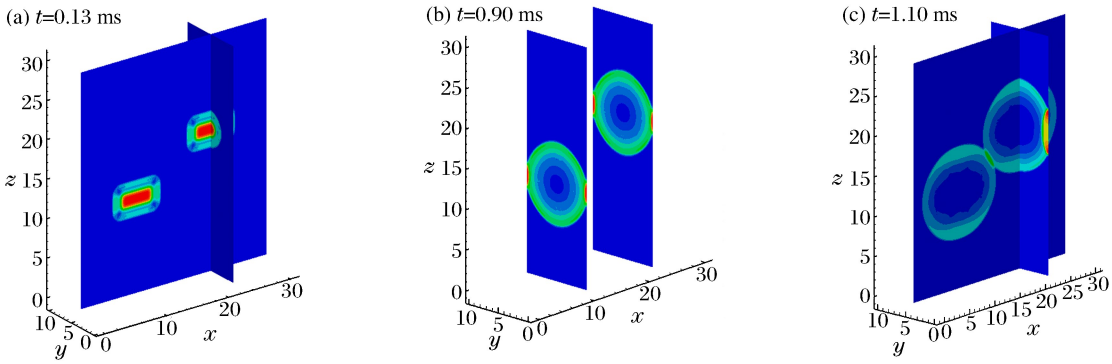

图 5 算例 2 流场压力云图

Fig. 5 Pressure cloud pictures of flow field of case 2

上点 1、2 的坐标分别为(6,0,12)、(21,0,18)。网格数量为 151×51×151。由图 5(a),柱形气泡首先膨胀,在水中产生一道压缩波,在气泡内部产生一道稀疏波,两个截面分别为 $y=5$ 和 $x=21$。由图 5(b),大约在 $t=0.90$ ms 时,压缩波到达壁面,并产生反射波,两个截面分别为 $x=9$ 和 $x=21$。由图 5(c),大约在 $t=1.10$ms 时,固壁的反射波与气泡发生作用,开始抑制气泡在径向上的膨胀;同时两个气泡膨胀产生的激波发生叠加,彼此抑制对方的膨胀。由图 6(a),激波在到达固壁后再反射的这个过程中,对固壁的作用区域为椭圆形。由图 6(b),柱形高压气泡在膨胀过程中,形状从圆柱逐渐向椭球变化。由图 6(c),两个指定点的压力峰值分别为约 4.11 和 6.56 MPa。

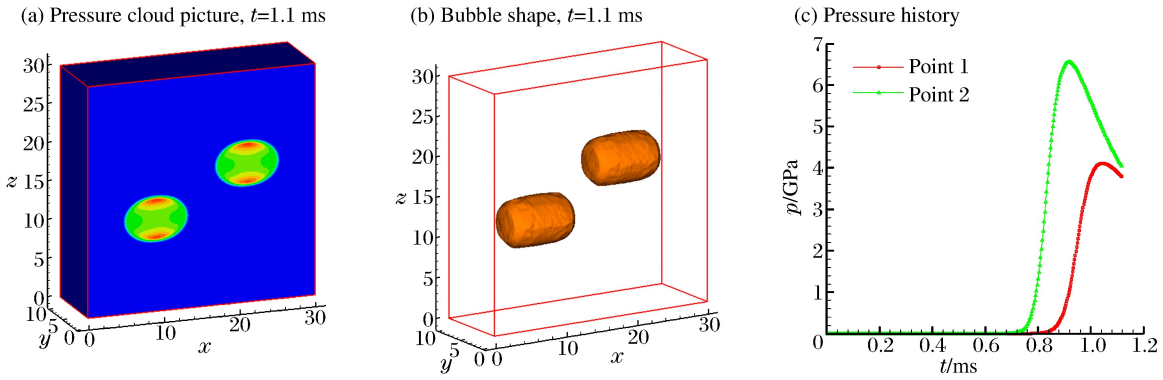

图 6 算例 2 的计算结果

Fig. 6 The calculation results of case 2

3 结 论

对柱形装药水下爆炸高压气泡膨胀过程进行了高精度数值模拟,给出了不同时刻压力云图、气泡形状的变化趋势以及指定点的压力曲线。在对流场的 level set 初值精确定义的前提下,用 RGFM 结合高精度格式(五阶 WENO、四阶 R-K 法)可以很好地处理柱形高压气泡膨胀问题以及追踪高密度比、高压力比的气水界面。计算结果表明,柱形高压气泡在膨胀过程中,其形状逐渐向椭球形变化。受固壁反射波的影响,高压气泡在固壁法线方向上的膨胀受到抑制;双圆柱形高压气泡膨胀产生的激波,可以彼此抑制另一个气泡的膨胀。

参考文献:

[1] Plesset M S. The dynamics of cavitation bubbles[J]. Journal of Applied Mechanics, 1949,16(16):277-282.

[2] Blake J R, Gibson D C. Growth and collapse of a vapour cavity near a free surface[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1981,111:123-140.

[3] Pearson A, Cox E, Blake J R, et al. Bubble interactions near a free surface[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2004,28(4):295-313.

[4] Vernon T A. Whipping response of ship hulls from underwater explosion bubble loading[R]. Dartmouth, Nova Scotia: Defence Research Estabishment, 1986.

[5] Zong Z. A hydroplastic analysis of a free-free beam floating on water subjected to an underwater[J]. Journal of Fluids and Structures, 2005,20(3):359-372.

[6] Russo G, Smereka P. A remark on computing distance functions[J]. Journal of Computational Physics, 2000,163(1):51-67.

[7] Wang C W, Liu T G, Khoo B C. A real ghost fluid method for the simulation of multimedium compressible flow [J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2006,28(1):278-232.

[8] Osher S, Sethian J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations[J]. Journal of Computational Physics, 1988,79(1):12-49.

[9] Sussman M, Smereka P, Osher S. A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow [J]. Journal of Computational Physics, 1994,114(1):146-159.

[10] 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(2):651-681.

[11] Aslam T. A partial differential equation approach to multidimensional extrapolation[J]. Journal of Computational Physics, 2004,193(1):349-355.

[12] Wardlaw Jr A B. Underwater explosion test cases[R]. Indian Head Division: Naval Surface Warfare Center, 1998.

[13] Shu C W. Essentially non-oscillatory and weighted essentially non-oscillatory schemes for hyperbolic conservation laws[C]// Advanced numerical approximation of nonlinear hyperbolic equations. Springer, 1997:325-432.

[14] Shu C W, Osher S. Efficient implementation of essentially non-oscillatory shock capturing schemes[J]. Journal of Computational Physics, 1988,77(2):439-471.

[15] Jiang G S, Peng D. Weighted ENO schemes for Hamilton-Jacobi equations[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2000,21(6):2126-2143.

Simulation of expanding process of high pressure cylindrical bubbles in underwater explosion using RGFM and high accuracy schemes*

Shi Ru-chao[1], Zhang Ya-jun[2], Xu Sheng-li[1]

(1. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *Anhui, China*;
2. *Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: This paper presents a 3D numerical simulation of expanding process of high pressure cylindrical bubbles in underwater explosion. Level set method was used to track gas-water interface. The detail on precise definition of initial level set values of cylindrical bubble was also provided. The flow field was solved by Euler equation with fifth-order WENO spatial discretization and fourth-order R-K (Runge-Kutta) time discretization. HJ-WENO was employed to discretized level set equation. The flow states at grid nodes just next to gas-water interface were updated by RGFM algorithm. Pressure cloud pictures at different times, the shape changes of high pressure bubbles and pressure peak at given points were offered. Some interesting conclusions are concluded, as that high pressure cylindrical bubble becomes ellipsoidal gradually during expanding process, the expansion of bubbles nearby the wall is restricted in the normal by reflected wave, and expansion of double cylindrical bubbles is restricted by shock wave from each other. The numerical results also show excellent performance of RGFM and high accuracy scheme when applied to simulation of high pressure cylindrical bubbles expanding.

Key words: mechanics of explosion; expanding of high pressure bubble; level set method; underwater explosion; high accuracy scheme; ghost fluid method

---

* Received 10 December 2012; Revised 7 April 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (10902110)
Corresponding author: Shi Ru-chao, rcshi@mail.ustc.edu.cn

(责任编辑　丁　峰)