

# 空中爆炸问题的高精度数值模拟研究

赵海涛, 王成

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 针对空中爆炸初期强间断和爆炸后期接触间断物理特性, 提出了虚拟流体方法(GFM)和真实虚拟流体方法(RGFM)2种界面处理方法相耦合的计算方法。在高密度比、高压比同时存在的爆炸初期和压力、密度及速度等物理量相接近的爆炸后期, 分别采用RGFM和GFM对物质界面两侧物理量进行处理。采用Local Level Set方法对运动界面进行追踪, 并用5阶高精度加权本质非振荡(WENO)格式和3阶TVD Runge-Kutta方法对控制方程进行离散, 编制了空中爆炸数值模拟程序, 应用该程序对不同高度近地面空中爆炸以及冲击波与挡墙相互作用问题进行数值模拟, 模拟结果能够较好地反映空中爆炸中冲击波的产生、传播、反射、绕射及爆炸产物的膨胀等现象, 并与经验公式和试验结果吻合较好。证明了该耦合方法能够模拟空中爆炸问题, 并且爆炸波在传播过程中具有很好的对称性, 为模拟高密度比、高压比的多物质之间相互作用问题提供了有效的计算方法。

**关键词:** 爆炸力学; 加权本质非振荡; 真实虚拟流体方法; 数值模拟; 空中爆炸; 高精度  
**中图分类号:** O382<sup>+</sup>.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1093(2013)12-1536-11  
**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.12.008

## High Resolution Numerical Simulation of Air Explosion

ZHAO Hai-tao, WANG Cheng

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** According to the physical characteristics of strong discontinuity at early stage of air explosion and its contact discontinuities at late stage, a new method coupling the ghost fluid method(GFM) with real GFM (RGFM) is proposed to treat the interface. At the initial stage, the situation where high density ratio and pressure ratio co-exist is treated by RGFM, while at the late stage, because explosion pressure, density and velocity, et al. Come close to each other, GFM is used to treat the interface. The moving interface is tracked by Local Level Set method. The governing equations are discretized by high resolution 5th-order weighted essentially non-oscillatory (WENO) scheme and 3rd - order TVD Runge-Kutta scheme. The air explosion is programmed. Using this program, air explosion at different heights and different distances are simulated. The simulation results accord well with the results obtained from empirical formula and experiments, which satisfactorily reflects the shock wave generation, propagation, reflection from the ground, and diffraction of shock wave, and the expansion of explosion products. The result shows that this method can be employed to simulate air explosion, and the explosion wave has good symmetry during propagating. The approach is effective for simulating the interaction of multi-medium

收稿日期: 2013-10-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(11272056、11325209); 爆炸科学与技术国家重点实验室自主研究课题重点项目(ZDKT11-01)

作者简介: 赵海涛(1981—), 男, 博士研究生。E-mail: 10902066@bit.edu.cn;

王成(1972—), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: wangcheng@bit.edu.cn

flows at high density ratio and pressure ratio.

**Key words:** explosion mechanics; weighted essentially non-oscillatory; real ghost fluid method; numerical simulation; air explosion; high resolution

## 0 引言

由于数值模拟技术具有低成本、低危险性、高效率的优点,已成为研究空中爆炸的重要手段。国内外已有不少学者对空中爆炸后冲击波地面荷载的计算和近地面爆炸时流场特征<sup>[1-2]</sup>等问题进行了数值模拟研究,主要采用低阶精度算法或采用 LS-DYNA、AUTODYN 等商业软件进行模拟,爆炸冲击波在传播过程中并不能保持较好的对称性。

空中爆炸发生时,炸药瞬间变为高温高压的爆炸产物。在爆炸产物与空气之间,密度和压力梯度大。采用传统的计算方法,造成计算结果误差较大,甚至计算难以进行。真实虚拟流体方法(RGFM)能够很好地处理强间断问题,具有引入误差小、计算稳定性好等特点。由于爆炸后期空气与爆轰产物处的间断变的很微弱,采用虚拟流体方法(GFM)进行处理,大大减少了 RGFM 中迭代求解 Riemann 问题时的计算量,提高了计算效率。同时采用 Local Level Set 方法对运动界面进行追踪,并用 5 阶高精度加权本质非振荡(WENO)格式和 3 阶 TVD Runge-Kutta 方法对空中爆炸问题的控制方程组进行离散。基于自主研发的程序对近地面空中爆炸及冲击波与挡墙相互作用问题进行了数值模拟,模拟结果很好的反映了近地面空中爆炸冲击波的传播、反射、绕射,与经验公式和试验结果吻合较好。

## 1 计算方法

### 1.1 空中爆炸问题的控制方程组

以非定常可压缩 Euler 方程组作为空中爆炸问题的控制方程组形式<sup>[3]</sup>为

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

$$\begin{cases} \mathbf{U} = (\rho, \rho u, \rho v, \rho E)^T, \\ \mathbf{F} = (\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, \rho u(E + p/\rho))^T, \\ \mathbf{G} = (\rho v, \rho uv, \rho v^2 + p, \rho v(E + p/\rho))^T, \\ E = e + \frac{1}{2}(u^2 + v^2), \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\rho$  为密度; $p$  为压强; $u, v$  分别为  $x$  方向、 $y$  方向的速度; $E$  为单位质量总能量; $e$  为比内能。

### 1.2 状态方程

气体状态方程采用(3)式形式:

$$p = (\gamma - 1)\rho e, \quad (3)$$

式中: $\gamma$  为气体的比热比。

### 1.3 离散方法

在空间上,采用 5 阶高精度 WENO 格式<sup>[4]</sup>对各数值通量进行构造,其半离散格式为

$$\left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t}\right)_{i,j} = \frac{(\hat{\mathbf{F}}_{(i-\frac{1}{2})j}^+ + \hat{\mathbf{F}}_{(i-\frac{1}{2})j}^-) - (\hat{\mathbf{F}}_{(i+\frac{1}{2})j}^+ + \hat{\mathbf{F}}_{(i+\frac{1}{2})j}^-)}{\Delta x} + \frac{(\hat{\mathbf{G}}_{i,(j-\frac{1}{2})}^+ + \hat{\mathbf{G}}_{i,(j-\frac{1}{2})}^-) - (\hat{\mathbf{G}}_{i,(j+\frac{1}{2})}^+ + \hat{\mathbf{G}}_{i,(j+\frac{1}{2})}^-)}{\Delta y}, \quad (4)$$

式中: $\hat{\mathbf{F}}_{(i\pm\frac{1}{2})j}^\pm, \hat{\mathbf{G}}_{i,(j\pm\frac{1}{2})}^\pm$  为数值通量。

在时间上,采用 3 阶 TVD Runge-Kutta 格式进行离散,具体形式为

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{i,j}^{(1)} = \mathbf{U}_{i,j}^n + \Delta t L(\mathbf{U}_{i,j}^n), \\ \mathbf{U}_{i,j}^{(2)} = \frac{3}{4}\mathbf{U}_{i,j}^n + \frac{1}{4}\mathbf{U}_{i,j}^{(1)} + \frac{1}{4}\Delta t L(\mathbf{U}_{i,j}^{(1)}), \\ \mathbf{U}_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{3}\mathbf{U}_{i,j}^n + \frac{2}{3}\mathbf{U}_{i,j}^{(2)} + \frac{2}{3}\Delta t L(\mathbf{U}_{i,j}^{(2)}). \end{cases} \quad (5)$$

## 2 界面追踪及处理方法

对于物质界面的处理,传统的 GFM 方法<sup>[5]</sup>可以很好地处理接触间断及弱激波与界面的相互作用如图 1 所示。

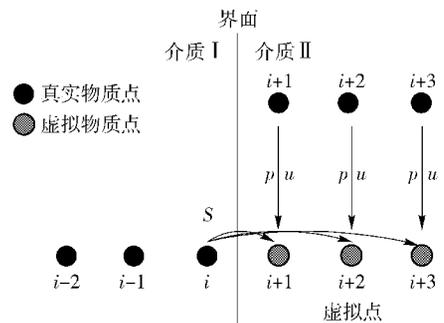


图 1 GFM 方法示意图

Fig. 1 Sketch of GFM

假设界面位于节点  $i$  和节点  $i + 1$  之间,节点  $i$  处 Level Set 函数  $\varphi < 0$ , 节点  $i + 1$  处  $\varphi > 0$ 。由于物质界面两侧压力和速度是连续的,密度是间断的,因此在 GFM 中,介质 I 虚拟点的压力和速度采用介质 II 中节点的压力和速度,介质 II 虚拟点的熵采用介质 I 中节点  $i$  的熵  $S$ ,通过密度、熵和压力之间的关系确定虚拟点的密度。

由于传统的 GFM 在解决强间断问题时会引起虚假的物理解。针对空中爆炸初期问题的强间断特性,在空中爆炸初期采用 RGFM<sup>[6]</sup> 确定虚拟点的物理量,如图 2 所示。

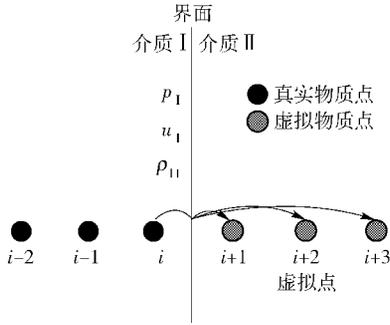


图 2 RGFM 方法示意图  
Fig. 2 Sketch of RGFM

构建 Riemann 问题时,界面两侧物理状态通过节点  $i$  和节点  $i + 1$  物理状态确定,取节点  $i$  物理量定义界面在  $\varphi < 0$  一侧的物理状态  $U_-$ ,节点  $i + 1$  的物理量定义界面在  $\varphi > 0$  一侧的物质状态  $U_+$ ,然后进行 Riemann 求解。用 Riemann 问题解中介质 I 一侧的密度、压力和速度,对节点  $i$  的密度、压力和速度进行修正,并且将各物理量外推到界面另一侧的虚拟点上。同理,用介质 II 一侧 Riemann 问题解中的密度、压力和速度,对节点  $i + 1$  进行修正并外推到相应的虚拟点上。

对于二维问题,沿界面法线方向,用界面两侧节点的物理量表示界面两侧的物理状态,建立局部 Riemann 问题如图 3 所示。

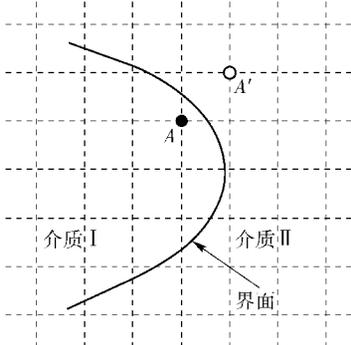


图 3 建立局部 Riemann 问题示意图  
Fig. 3 Sketch of establishment of local Riemann issue

介质 I 的物理状态,由紧邻界面处的节点  $A$  的物理量表示。在介质 II 中选取紧邻界面的节点  $A'$ ,使得连线  $AA'$  与  $A$  点处界面的法线之间的夹角最小,采用节点  $A'$  的物理量表示介质 II 的物理状态。

确定界面两侧物理状态后,与一维情况相同,求解 Riemann 问题,确定  $A$  点各物理量,然后沿界面法向将各物理量外推,从而确定虚拟点的物理状态。

在爆炸场中,冲击波前后存在压力和速度的间断,因此在计算 Level Set 函数时,如果直接采用求解的速度场,则在冲击波阵面前后位置速度场是间断的,这样在计算全场的 Level Set 函数时,在冲击波附近的 Level Set 函数值计算误差较大,从而影响全场计算结果。本文对运动物质界面采用 Local Level Set 方法<sup>[7]</sup>进行追踪如图 4 所示。

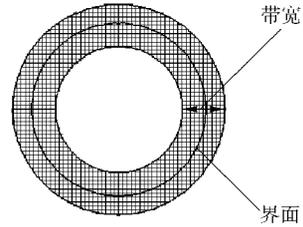


图 4 Local Level Set 方法示意图  
Fig. 4 Sketch of Local Level Set

该方法对远离物质界面区域的速度进行修正,避免了远场 Level Set 函数值对界面附近函数值的影响,提高了计算的准确度。

$$\varphi_t + c(\varphi) \mathbf{v}_t \cdot \nabla \varphi = 0, \quad c(\varphi) = \begin{cases} 1, & |\varphi| \leq \beta; \\ \frac{(|\varphi| - \gamma)^2 (2|\varphi| + \gamma - 3\beta)}{(\gamma - \beta)^3}, & \beta < |\varphi| \leq \gamma; \\ 0, & |\varphi| > \gamma. \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{v}_t = (u, v)$  为流场速度矢量; $\beta$  和  $\gamma$  由计算格式精度确定,这里  $\beta$  取 10 倍网格宽度, $\gamma$  取 15 倍网格宽度。

### 3 二维空中爆炸模拟算例

#### 3.1 验证

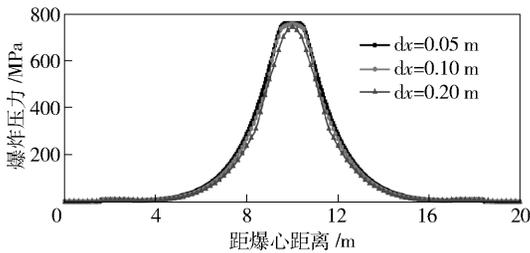
##### 3.1.1 收敛性验证

将本文的计算方法应用于空中爆炸问题中,先对其收敛性进行验证。算例中 TNT 当量 2 000 kg,爆炸产物半径 2.0 m,计算时间  $t = 6.32 \text{ ms}$ , CFL 条件数为 0.6,计算区域为  $[0, 20 \text{ m}] \times [0, 20 \text{ m}]$ 。

$$(x - 10.0)^2 + (y - 10.0)^2 \leq 4.0; \rho = 2.214 \times 10^3 \text{ kg/m}^3, u = 0.0 \text{ m/s}, v = 0.0 \text{ m/s}, p = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}, \gamma = 2.85;$$

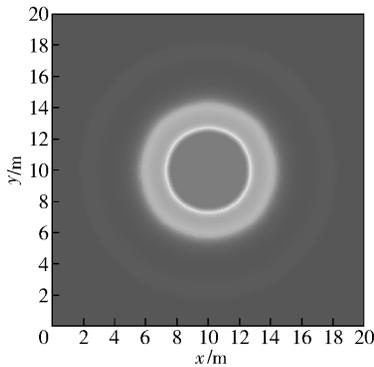
$$(x - 10.0)^2 + (y - 10.0)^2 > 4.0; \rho = 1.29 \text{ kg/m}^3, u = 0.0 \text{ m/s}, v = 0.0 \text{ m/s}, p = 0.1 \text{ MPa}, \gamma = 1.4.$$

如图 5 所示采用不同网格尺寸模拟空中爆炸问题的计算结果。

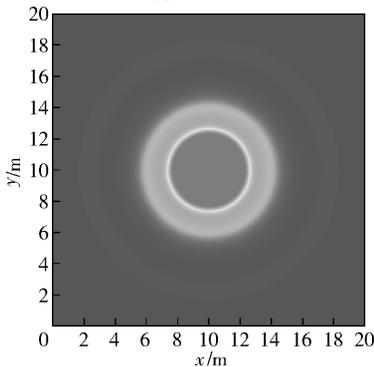


(a)  $t=6.32$  ms 时不同爆心距离爆炸压力分布图

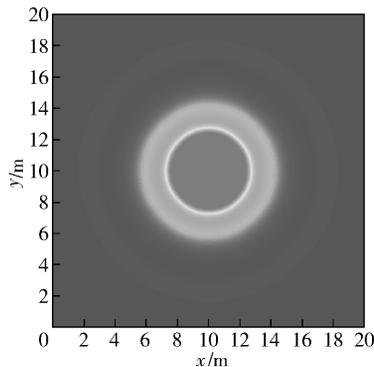
(a) The distribution graph of explosion pressures at different distances from explosion center when  $t=6.32$  ms



(b)  $dx=0.20$  m



(c)  $dx=0.10$  m



(d)  $dx=0.05$  m

图 5 网格收敛性图

Fig. 5 Grid convergence

由图 5(a) 可看出, 随着网格的细分, 不同网格尺寸下的压力曲线最终能够趋于一致。当  $dx =$

0.05 m、0.10 m 时, 压力曲线几乎完全重叠, 表明所采用的算法能够收敛; 由图 5(b) ~ 图 5(d) 可看出, 随着网格尺寸的减小, 物质界面和流场特征更加清晰, 网格尺寸为 0.05 m、0.10 m 时的计算结果差别很小。因此, 在保证计算精度的基础上本文在以下的计算中选取  $dx = 0.10$  m 作为网格尺寸。

### 3.1.2 模拟结果与经验公式和试验结果的对比

空中爆炸自由场常用计算经验公式有萨道夫斯基 (SDF) 公式、亨利奇 (Henry-Key) 公式和金尼-格雷厄姆 (K-G) 公式<sup>[8]</sup>:

1) SDF 公式:

$$\Delta p_{\max} = \frac{0.84}{\bar{R}} + \frac{2.7}{\bar{R}^2} + \frac{7}{\bar{R}^3}, 1 \leq \bar{R} \leq 15; \quad (7)$$

2) Henry-Key 公式:

$$\Delta p_{\max} = \begin{cases} \frac{14.0717}{\bar{R}} + \frac{5.5397}{\bar{R}^2} + \frac{0.3572}{\bar{R}^3} + \frac{0.00625}{\bar{R}^4}, & 0.05 \leq \bar{R} \leq 0.30; \\ \frac{6.1938}{\bar{R}} + \frac{0.3262}{\bar{R}^2} + \frac{2.1324}{\bar{R}^3}, & 0.30 \leq \bar{R} \leq 1.00; \\ \frac{0.662}{\bar{R}} + \frac{4.05}{\bar{R}^2} + \frac{3.288}{\bar{R}^3}, & 1.00 \leq \bar{R} \leq 10.00. \end{cases} \quad (8)$$

3) K-G 公式:

$$\frac{\Delta p_{\max}}{p_a} = \frac{808 \left[ 1 + \left( \frac{f_d \bar{R}}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left( \frac{f_d \bar{R}}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{f_d \bar{R}}{0.32} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{f_d \bar{R}}{1.35} \right)^2}}, 0.053 \leq \bar{R} \leq 500, \quad (9)$$

$$f_d = \sqrt{\frac{p_a}{p_{0a}} \cdot \frac{T_{0a}}{T_a}}, \quad (10)$$

式中:  $\bar{R}$  为比例距离,  $\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{W}}$ ;  $R$  为测点到爆心的距离;  $W$  为装药的 TNT 当量;  $\Delta p_{\max}$  为入射冲击波峰值超压;  $f_d$  为大气传输因子;  $p_a$  为试验现场大气压;  $p_{0a}$  为标准大气压, 取  $1.03 \text{ kg/cm}^2$ ;  $T_a$  为试验场的大气温度,  $T_{0a}$  取标准大气温度, 取为  $288.16 \text{ K}$ 。

如图 6 所示 TNT 当量 2000 kg 时爆炸最大压力与距爆心距离关系曲线图。

可看出, 在爆炸的初始阶段, SDF 公式计算的爆炸压力最高, Henry-Key 公式其次, K-G 公式计算结

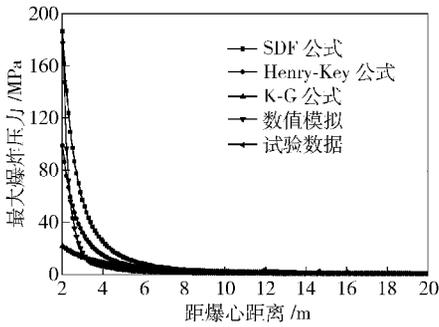


图 6 模拟结果与经验公式对比

Fig. 6 Comparison of the simulated results and the calculated results of an empirical formula

果最低,而本文的模拟结果处于 SDF 公式和 Henry-Key 公式计算结果之间;随着距爆心距离增加,最大压力迅速下降,模拟结果在距爆心距离约 3 m 位置与 Henry-Key 公式计算结果相同,随后模拟结果处于 Henry-Key 公式和 K-G 公式计算结果之间;当距爆心距离大于 9 m 时,模拟结果与经验公式计算结果几乎重合;模拟结果与文献[9]中试验结果折算的最大爆炸压力进行比较,二者吻合较好。因此,本文的计算方法给出的空中爆炸的爆心距离与爆炸最大压力之间的关系与试验和经验公式吻合较好。

如图 7 所示本文提出的计算方法和商业软件

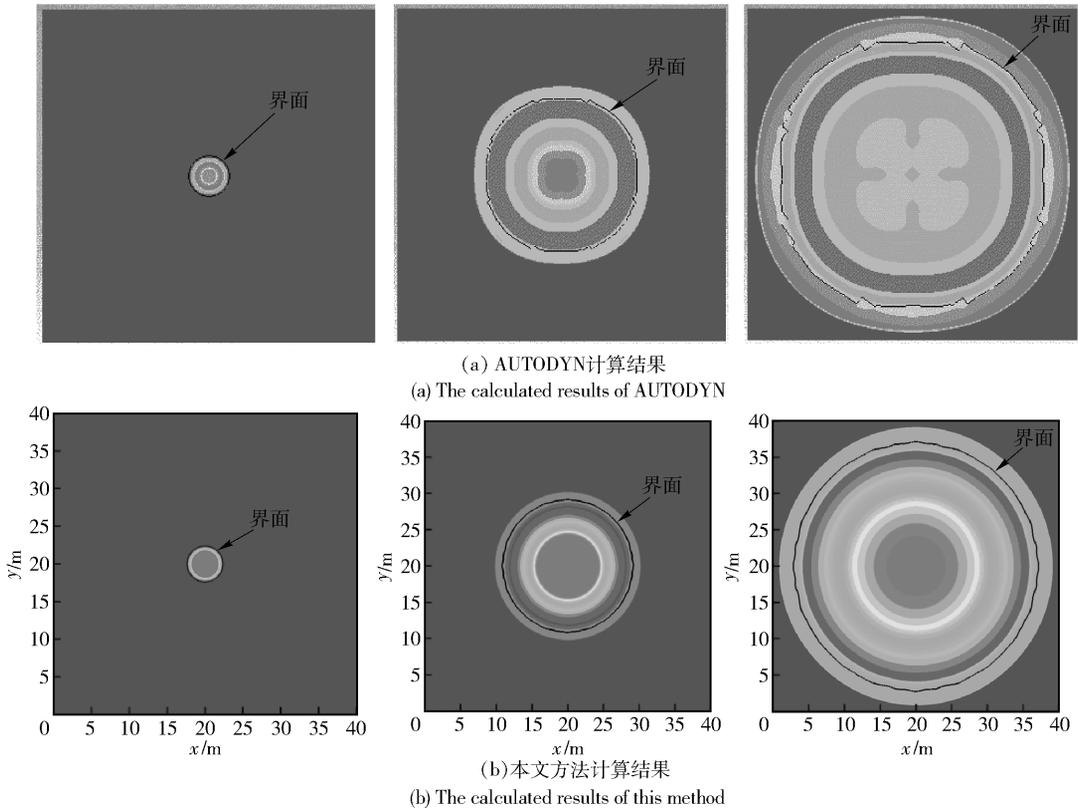


图 7 计算结果与 AUTODYN 软件计算结果对比

Fig. 7 Comparison of the results calculated by the method proposed in the paper and AUTODYN software

AUTODYN 软件计算空中爆炸问题的结果的对比如。

计算域 $[0, 40 \text{ m}] \times [0, 40 \text{ m}]$ , 网格尺寸  $dx = dy = 0.10 \text{ m}$ , 在 AUTODYN 计算结果中黑线为爆轰产物与空气之间的界面。由图 7(a) 可看出, 在计算初期 AUTODYN 软件的计算结果中冲击波对称性较好, 符合冲击波传播规律。随着计算时间的增加, 冲击波波阵面逐渐变形且爆轰产物与空气之间的界面不能保持光滑, 逐渐变为方形, 与物理特征偏离较大; 由图 7(b) 可看出, 爆炸冲击波在传播过程中能够保持很好的对称性, 爆轰产物与空气界面之间的界

面光滑, 在计算后期物质界面有一定抖动, 原因在于爆炸后期爆炸产物与空气的界面两侧各物理量之间都很接近, 致使界面不稳定造成的。

### 3.2 算例分析

#### 3.2.1 近地面爆炸模拟

对于近地面空中爆炸问题, 爆炸产生的冲击波与地面进行作用, 在不同药量和高度下, 不仅发生正规反射, 且能发生马赫反射。TNT 当量 2 000 kg, 爆心距地 10 m, 爆炸产物半径 2.0 m, CFL 条件数 0.6, 计算区域 $[0, 40 \text{ m}] \times [0, 40 \text{ m}]$ 。

$(x - 20.0)^2 + (y - 10.0)^2 \leq 4.0$  初始值为  $\rho = 2.214 \times 10^3 \text{ kg/m}^3, u = 0.0 \text{ m/s}, v = 0.0 \text{ m/s}, p = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}, \gamma = 2.85$ ;  
 $(x - 20.0)^2 + (y - 10.0)^2 > 4.0$  初始值为  $\rho =$

$1.29 \text{ kg/m}^3, u = 0.0 \text{ m/s}, v = 0.0 \text{ m/s}, p = 0.1 \text{ MPa}, \gamma = 1.4$ .

如图 8 所示不同时刻的近地面空中爆炸压力分布图。

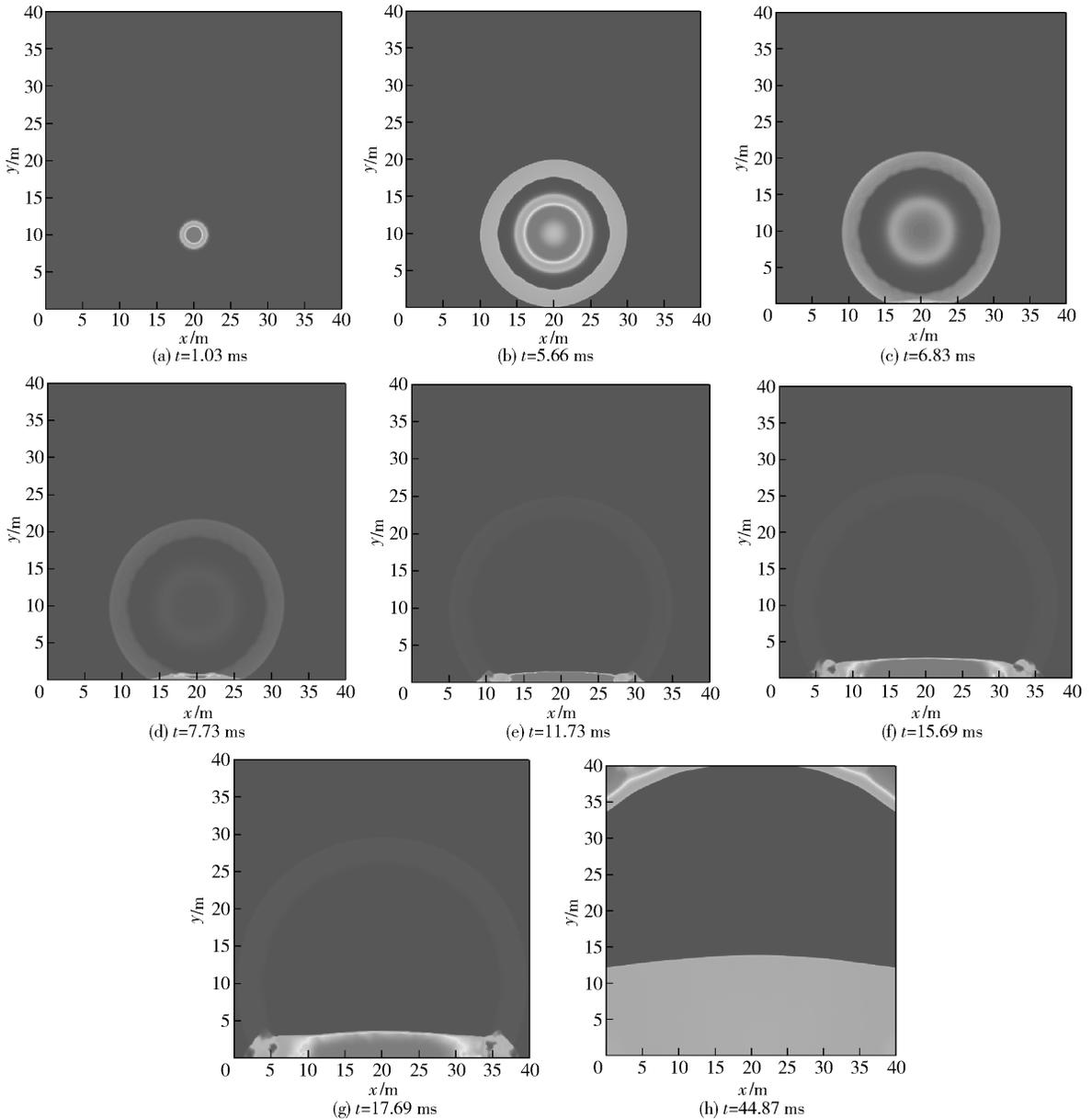


图 8 近地面空中爆炸计算结果图

Fig. 8 The calculated results of air explosion above the near ground

由图 8(a) 可看出, 炸药在空气中爆炸时, 瞬间形成高温高压气体。高温高压气体与周围静止的空气相互作用, 产生向空气中传播的冲击波和向爆炸产物中传播的稀疏波; 图 8(b)、图 8(c) 给出了爆炸冲击波并与爆炸产物分离, 向四周传播, 并在地面处发生反射的过程; 图 8(d)、图 8(e) 中, 爆炸冲击波在地面发生正规反射, 反射波向上传播与爆炸产物

作用, 反射波与入射波叠加使地面附近压力很高, 随后爆炸产物传播到地面处, 并与地面相互作用; 由图 8(f)、图 8(g) 可看出, 爆炸冲击波在地面发生马赫发射, 马赫波的传播速度大于入射冲击波和地面反射波的速度, 随着爆炸冲击波的继续传播, 以及冲击波与地面的相互作用, 马赫波的传播距离远大于反射波和入射波的传播距离, 从而在马赫波后方存

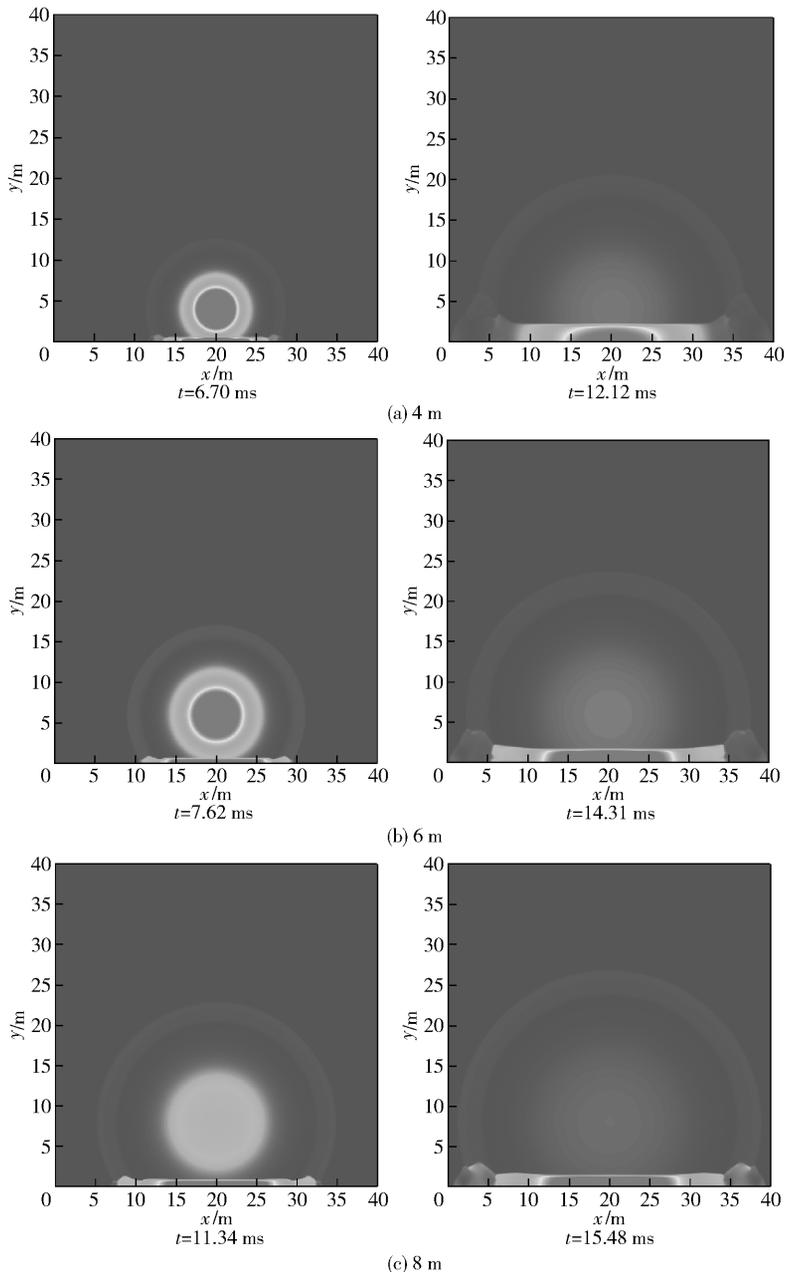
在一低压力区;由图 8(h)可看出,爆炸产生的冲击波以及爆炸产物传出计算域,在计算域边界处没有明显的扰动,地面反射波继续向上传播高过炸药爆炸位置,反射波压力逐渐减小,其特征与近地面空中爆炸反射波分布趋势一致<sup>[10]</sup>。计算结果很好地反映了近地面空中爆炸中冲击波的产生、传播、正规反射、马赫反射及爆炸产物传播等演化规律。

### 3.2.2 离地面不同高度空中爆炸模拟

在空中爆炸中,随着爆心距地面高度的不同,在地面处开始发生马赫反射的位置也不同。距地 4 m、6 m、8 m、10 m 时空中爆炸产生的冲击波在地面处的反射情况如图 9 所示。

可看出,随着爆心距地高度增加,发生马赫反射

位置距地心越来越远,且在地面处反射波的传播速度逐渐降低。这是由于爆心距地越高,入射冲击波传播到地面时压力衰减越大,地面反射后压力随之降低导致的。当爆心距地 4 m 时,地面反射波传播到 8 m 附近形成马赫反射。当爆炸冲击波传播约 15 m 时,马赫波传出计算域;当爆心距地 6 m、8 m 时,地面处的反射波分别传播到 10 m、13 m 附近发生马赫反射。当爆炸冲击波传播约 18 m、19 m 时的马赫波传出计算域如图 9(b)、图 9(c)所示;如图 9(d)所示,当爆心距地 10 m 时爆炸冲击波传播约 20 m 时才能在地面处发生马赫反射。由以上分析可知:当爆心距地较近时,地面反射压力较大,地面处马赫波传播速度也较快;随着爆心距地高度逐渐增加,地面



(c) 8 m

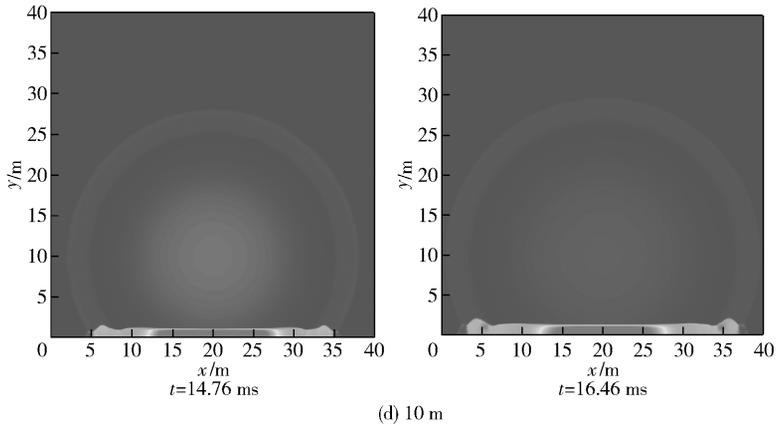


图 9 爆心距地面不同高度时压力云图

Fig. 9 The pressure distributions at different heights of explosion center above the ground

处反射压力逐渐降低,地面处马赫波传播速度也较低,这与近地面空中爆炸发生马赫反射的物理规律相一致。

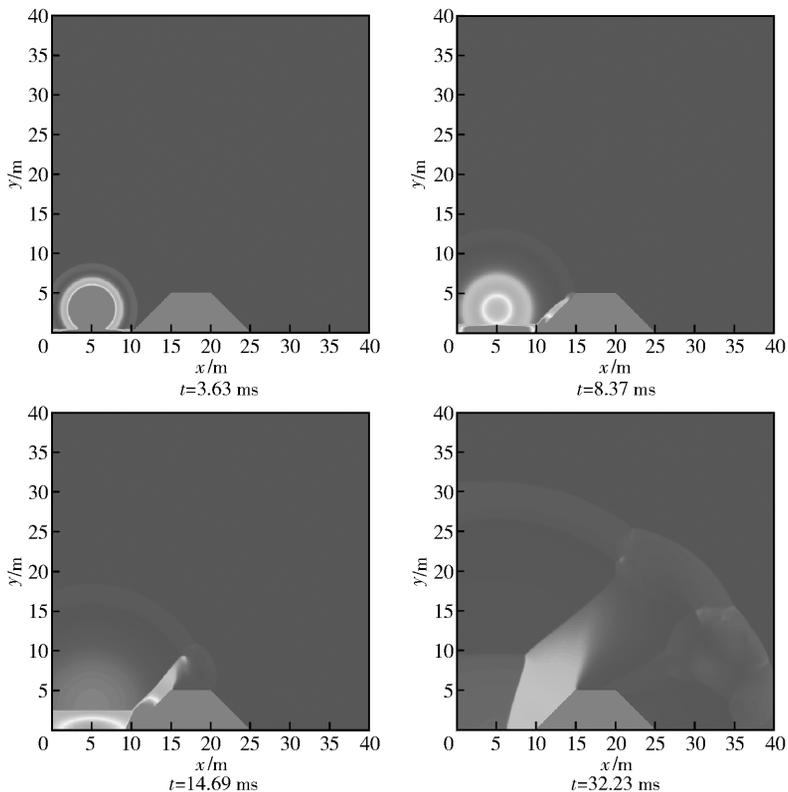
### 3.2.3 爆炸距挡墙不同位置时的模拟

在空中爆炸中,随着爆心距挡墙位置不同,冲击波与挡墙作用后情况也有一定差别。TNT 当量 2 000 kg,爆心距地 3 m,爆炸产物半径 2.0 m,梯形挡墙斜度 45°,上底面宽 5 m,下底面宽 15 m,挡墙高 5 m。算例中下底面距爆心分别为 5 m 和 15 m,CFL 条件数 0.6,计算区域 $[0,40\text{ m}] \times [0,40\text{ m}]$ 。  $(x - 5.0)^2 +$

$(y - 3.0)^2 \leq 4.0$  初始值为  $\rho = 2.214 \times 10^3\text{ kg/m}^3, u = 0.0\text{ m/s}, v = 0.0\text{ m/s}, p = 2.06 \times 10^5\text{ MPa}, \gamma = 2.85$ ; 除挡墙外的其余部分初始值为  $\rho = 1.29\text{ kg/m}^3, u = 0.0\text{ m/s}, v = 0.0\text{ m/s}, p = 0.1\text{ MPa}, \gamma = 1.4$ 。

如图 10 所示爆心距挡墙不同距离时的压力云图。

如图 10(a)所示爆心距挡墙 5 m 时冲击波传播、反射及绕射情况。 $t = 3.63\text{ ms}$  时,空气中传播的冲击波与地面作用产生的马赫波都刚刚到达挡墙处,与近地面空中爆炸情况相近; $t = 8.37\text{ ms}$  时,马



(a) 5 m

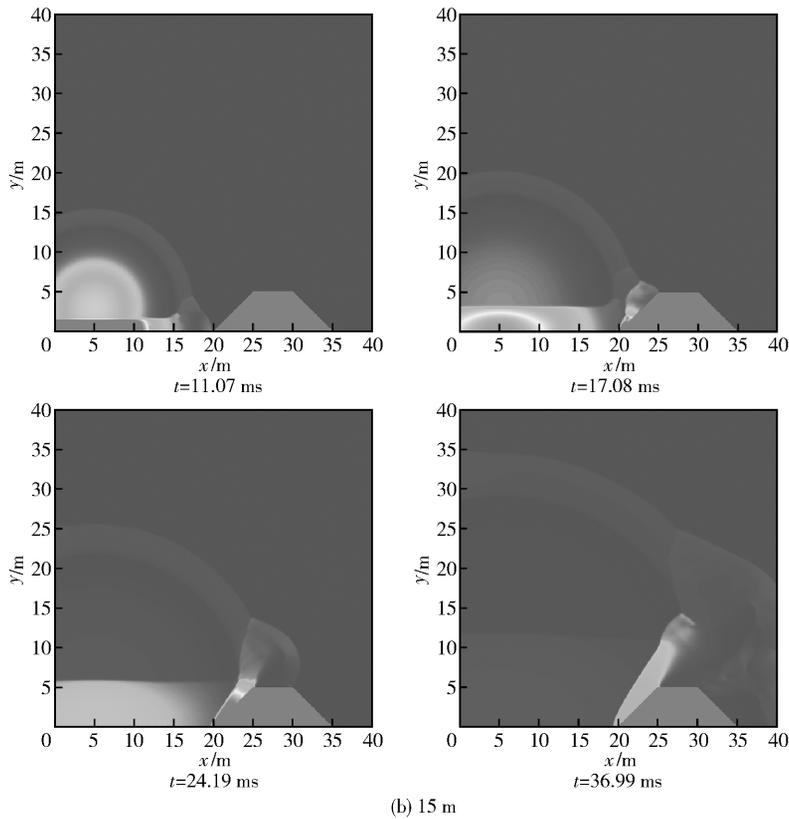


图 10 爆心距挡墙不同距离时压力云图

Fig. 10 The pressure distributions at different distances of explosion center from retaining wall

赫波和爆炸冲击波在挡墙左侧产生很强的反射; $t = 14.69 \text{ ms}$ 时,爆炸产生的冲击波从挡墙上部传过,并在挡墙后方发生绕射; $t = 32.23 \text{ ms}$ 时,冲击波继续传播,由于挡墙的作用在冲击波传播过程中有很大一部分能量向空中传播,挡墙后的冲击波小于挡墙前面的冲击波。

如图 10(b)所示爆心距挡墙 15 m 时冲击波传播、反射及绕射情况。 $t = 11.07 \text{ ms}$ 时,马赫波传到了挡墙处,爆炸冲击波还未传到挡墙处,原因在于爆炸冲击波经地面反射后增强,传播速度加快的结果; $t = 17.08 \text{ ms}$ 时,马赫波与挡墙作用发生反射,反射波与随后传到的爆炸冲击波之间相互作用; $t = 24.19 \text{ ms}$ 时,爆炸冲击波从挡墙上方继续向前传播,但由于挡墙的作用传过的能量降低; $t = 36.99 \text{ ms}$ 时,爆炸冲击波传出计算域,在挡墙后侧爆炸冲击波及绕射波对挡墙侧区域影响很小。通过模拟结果可看出:当挡墙距离爆炸较近时,爆炸冲击波与地面反射波几乎同时到达挡墙处在挡墙处发生反射,马赫波在挡墙处的反射与爆炸冲击波的反射相叠加,挡墙处压强陡然增大;当爆心距挡墙位置较远时,马赫波先传播到挡墙处在挡墙处先发生反射,反射波与随

后传到的冲击波作用在挡墙处马赫波和爆炸冲击波相互作用较明显。

### 3.2.4 爆炸距矩形挡墙不同位置时的模拟

TNT 当量 2 000 kg,爆心距地 5 m,爆炸产物半径 2.0 m,挡墙高 10 m,厚 3 m,算例中、下底面距爆心分别为 10 m、20 m, CFL 条件数 0.6,计算区域  $[0, 40 \text{ m}] \times [0, 40 \text{ m}]$ 。

$(x - 10.0)^2 + (y - 5.0)^2 \leq 4.0$  初始值为  $\rho = 2.214 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $u = 0.0 \text{ m/s}$ ,  $v = 0.0 \text{ m/s}$ ,  $p = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$ ,  $\gamma = 2.85$ ;除挡墙外其他部分初始值为  $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $u = 0.0 \text{ m/s}$ ,  $v = 0.0 \text{ m/s}$ ,  $p = 0.1 \text{ MPa}$ ,  $\gamma = 1.4$ 。

如图 11 所示爆心距矩形挡墙不同距离时,冲击波与矩形挡墙作用时反射及绕射的情况。

如图 11(a)所示爆心距挡墙 10 m 时冲击波传播、反射及绕射情况。 $t = 14.47 \text{ ms}$ 时,空气中传播的冲击波与地面反射产生的马赫波几乎同时到达挡墙处并发生反射; $t = 17.16 \text{ ms}$ 时,爆炸冲击波与地面作用产生的马赫波传播能量大于在空气中自由传播的爆炸冲击波,因此在挡墙左侧底部反射波的压力较大; $t = 35.71 \text{ ms}$ 时,在挡墙处发生绕射和反射

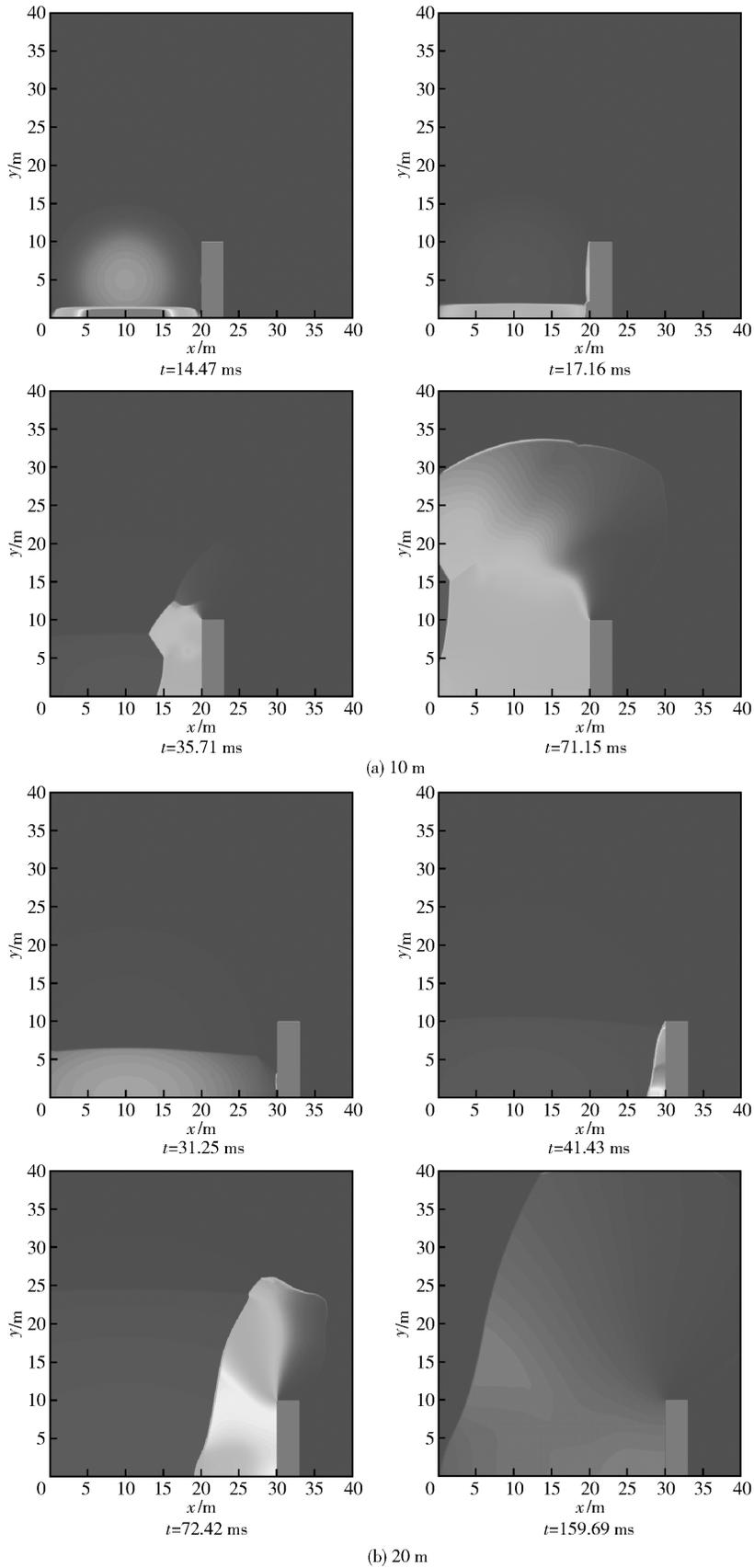


图 11 爆心距矩形挡墙不同距离时的压力云图

Fig. 11 The pressure distributions at different distances of explosion center from rectangular wall

且反射波上部向后传播较快; $t = 71.15$  ms 时,反射波继续向后传播逐渐传出计算域,绕射波对挡墙后方影响很小,与梯形挡墙的计算结果相似。

如图 11(b)所示爆心距挡墙 20 m 时冲击波传播、反射及绕射情况。 $t = 31.25$  ms 时,爆炸冲击波遇地面产生的马赫波传到了挡墙处并反射,此时爆炸的冲击波还未传到挡墙处; $t = 41.43$  ms 时,挡墙底部的反射波向后传播较快与爆炸冲击波相互作用; $t = 72.42$  ms, 159.69 ms 时,反射波向后传播,在挡墙后绕射波对挡墙后方影响很小。通过模拟结果可看出:当爆心距挡墙位置较远或较近时,爆炸作用的主要效果在挡墙底部;只有当爆心距挡墙一定位置时才能使爆炸冲击波和地面反射的马赫波同时作用于挡墙,从而达到更大的毁伤效果。

## 4 结论

采用 GFM 和 RGFM 相耦合的计算方法,对近地面空中爆炸问题进行了数值模拟。在空中爆炸初期,采用 RGFM 克服了物质界面两侧高密度比、高压比时,计算不稳定甚至难以计算等情况;爆炸后期,界面两侧密度、速度和压力等物理量相接近,采用 GFM 避免了界面两侧 Riemann 问题数值求解中反复迭代引入的误差且大大减少了 RGFM 中迭代求解 Riemann 问题时的计算量,提高了计算效率。模拟结果的最大爆炸压力与经验公式和试验结果吻合较好,验证了该方法的可靠性。在对近地面空中爆炸问题及空中爆炸场中存在挡墙问题的模拟中,模拟结果很好的反映了空中爆炸中冲击波的传播、反射、绕射及爆炸产物的运动等演化过程。该方法为理解和研究空中爆炸问题及其物理现象的演化过程提供了有效可行的数值研究手段。

## 参考文献 (References)

[1] 张洪武,何扬,张昌权. 空中爆炸冲击波地面荷载的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(2): 156-165.  
ZHANG Hong-wu, HE Yang, ZHANG Chang-quan. Numerical simulation on ground surface loading of shock wave from air

explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 1992, 12(2):156-165. (in Chinese)

[2] Alhussan K, Smetannikov A S, Stankevich Y A, et al. Computer modeling the hydrodynamics of explosion above a surface [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(7): 1608-1614.

[3] 吴开腾,郝莉,王成,等. Euler 方法中的 Level Set 界面处理及其应用研究[J]. 中国科学:G 辑, 2009, 39(9): 1204-1213.  
WU Kai-teng, HAO Li, WANG Cheng, et al. Level set interface treatment and its application in Euler method[J]. Scientia Sinica: G, 2009, 39(9): 1204-1213. (in Chinese)

[4] Jiang G S, Shu Q W. Efficient implementation of weighted ENO schemes[J]. Journal of Computational Physics, 1996, 126(1): 202-228.

[5] Fedkiw R P, Aslam T, Merriman B, et al. A non-oscillatory Eulerian approach to interface in multi-material flows (the ghost fluid method) [J]. Journal of Computational Physics, 1999, 152(1):457-492.

[6] Wang C W, Liu T G, Khoo B C. A real ghost fluid method for the simulation of multimediu compressible flow [J]. Society for Industrial and Applied Mathematics on Journal on Scientific Computing, 2006, 28(1):278-302.

[7] Peng D, Merriman B, Osher S, et al. A PDE-based fast Local Level Set method[J]. Journal of Computational Physics, 1999, 155(2): 410-438.

[8] 北京工业学院. 爆炸及其作用[M]. 北京:国防工业出版社, 1979.  
Beijing Institute of Technology. Explosion and its effect [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979. (in Chinese)

[9] 仲倩,王伯良,黄菊,等. TNT 空中爆炸超压的相似律[J]. 火炸药学报, 2010, 33(4): 32-35.  
ZHONG Qian, WANG Bo-liang, HUANG Ju, et al. Study on the similarity law of TNT explosion overpressure in air[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010, 33(4): 32-35. (in Chinese)

[10] 汪维,张舵,卢芳云,等. 大当量 TNT 装药爆轰的远场数值模拟及超压预测[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(1): 127-130.  
WANG Wei, ZHANG Duo, LU Fang-yun, et al. Simulation of thousands kilograms of TNT explosion shock wave in air at distance far away and forecast of the peak overpressure [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(1): 127-130. (in Chinese)