

文章编号: 1001-1455(2000)01-0001-06

多爆源云雾爆炸波相互作用的 三维数值研究^①

徐胜利¹, 岳鹏涛¹, 彭金华²

(1. 中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽 合肥 230026)

(2. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 从三维全 N-S 方程出发, 用二阶迎风 TVD 格式, 针对贴地和近地三种不同的爆源位置, 研究了两团云雾爆炸后爆炸场的相互作用。计算结果表明: 本文的方法可模拟多爆源爆炸后冲击波的传播和爆炸场复杂的波系结构。压力分布可确定爆炸场任意位置的压力时间变化历程。

关键词: 燃料空气炸药; 冲击波; 数值模拟

中图分类号: O381 文献标识码: A

1 引 言

燃料空气炸药 (FAE) 爆炸又称无约束云雾爆炸, 是典型的非理想爆源爆炸, 特点是能量释放速率和爆源体积均为有限值, 其背景为军事上的云爆武器和工业中的云雾爆炸灾害。对于象集束云爆弹 (CBU) 和工业中多爆源爆炸事故的爆炸场分析, 了解和预测冲击波传播、波系结构和演化历程以及某些特征点的超压值是极为重要的。但对于爆源爆炸场, 由于冲击波作用范围大、波系干扰复杂、实验前传感器位置难以确定等原因, 到目前为止, 相关研究工作的公开文献报道较少, 徐胜利等^[1] 曾对圆柱形和圆环形云雾爆炸后的爆炸场作过初步数值模拟, 但与实际三维爆炸场存在较大差距。本文目的是: 利用数值模拟手段和高精度 TVD 格式, 建立一套多爆源爆炸场冲击波作用过程、波系结构演化和指定点压力时间历程和压力分布的数值分析软件, 并为实验数据对比提供一条途径。针对贴地、近地三种典型爆源位置, 给出了对应的算例结果。

2 控制方程和数值方法

2.1 控制方程

不考虑爆源本身的能量释放过程, 多爆源爆炸场可用笛卡尔坐标下全 N-S 方程描述

$$\frac{\partial \mathbf{U}_g}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}_g}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_g}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}_g}{\partial z} = \frac{\partial \mathbf{E}_{g,v}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_{g,v}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}_{g,v}}{\partial z} \quad (1)$$

式中: 脚标 g、v 分别表示气相和粘性, \mathbf{E}_g 、 \mathbf{F}_g 、 \mathbf{G}_g , $\mathbf{E}_{g,v}$ 、 $\mathbf{F}_{g,v}$ 、 $\mathbf{G}_{g,v}$ 为对应 \mathbf{U}_g 的无粘、粘性矩阵。

① 收稿日期: 1999-03-23; 修订日期: 1999-05-27
基金项目: 中国科学院“九五”基础性研究重点项目。
作者简介: 徐胜利 (1965—), 男, 博士, 副教授。

各矩阵表达式见文献[2]。在本文中仅考虑层流。取变换 (τ, ξ, η, ζ) 以适合复杂域的计算。以爆源半径、静止空气参数为无量纲参数对方程(1)无量纲化,无量纲参考时间 $t_0=17.86\text{ms}$ 。由于爆炸场尺度大,所需计算网格数目多,受微机内存限制,沿地面附近无法布置足够的网格模拟边界层。因此,本文的计算相当于方程(1)中无粘计算的结果。

2.2 数值方法

气相方程(1)的二阶迎风 TVD 格式为

$$\begin{aligned} \hat{U}_{g,i,j,k}^{n+1} = & \hat{U}_{g,i,j,k}^n - \frac{\Delta\tau}{2\Delta\xi} [(\hat{E}_{g,i+1,j,k}^n - \hat{E}_{g,i-1,j,k}^n) + (\hat{F}_{g,i,j+1,k}^n - \hat{F}_{g,i,j-1,k}^n) + \\ & (\hat{G}_{g,i,j,k+1}^n - \hat{G}_{g,i,j,k-1}^n) - (\hat{E}_{g,v,i+1,j,k}^n - \hat{E}_{g,v,i-1,j,k}^n) - (\hat{F}_{g,v,i,j+1,k}^n - \hat{F}_{g,v,i,j-1,k}^n) - \\ & (\hat{G}_{g,v,i,j,k+1}^n - \hat{G}_{g,v,i,j,k-1}^n) + (R_{i+1/2,j,k}^n \varphi_{i+1/2,j,k}^n - R_{i-1/2,j,k}^n \varphi_{i-1/2,j,k}^n) + \\ & (R_{i,j+1/2,k}^n \varphi_{i,j+1/2,k}^n - R_{i,j-1/2,k}^n \varphi_{i,j-1/2,k}^n) + (R_{i,j,k+1/2}^n \varphi_{i,j,k+1/2}^n - R_{i,j,k-1/2}^n \varphi_{i,j,k-1/2}^n)] \end{aligned}$$

φ 的求法见文献[3]。

初始条件:指定爆源参数,爆源区域外给定静止空气参数。边值条件:沿地面采用固壁条件,对称轴采用对称条件,其它采用对流边界。

3 计算结果与讨论

本文研究两团可燃云雾爆炸场的相互作用,爆源位置如图1所示。两爆源形状和爆源参数可任意给定。由实验可知,云雾抛撒后爆源形状近似为圆柱形^[4]。为简单起见,本文取两爆源为相同的圆柱形,圆柱高度 H_0 和截面半径 R_0 分别为2.3、6.2m。对环氧丙烷抛撒形成的云雾爆炸,爆源初始参数由Gordon-MacBride程序^[5]计算得出,即 $p_2/p_1=21.0$ 、 $T_2/T_1=7.0$,高温燃气速度为零,与实验结果较接近^[4]。对图1(a)、(b),计算域取两爆源对称域的一半,网格分别为 $93 \times 63 \times 63$ 、 $93 \times 63 \times 61$ 。对图1(c),计算域包含两爆源,网格为 $108 \times 63 \times 54$ 。

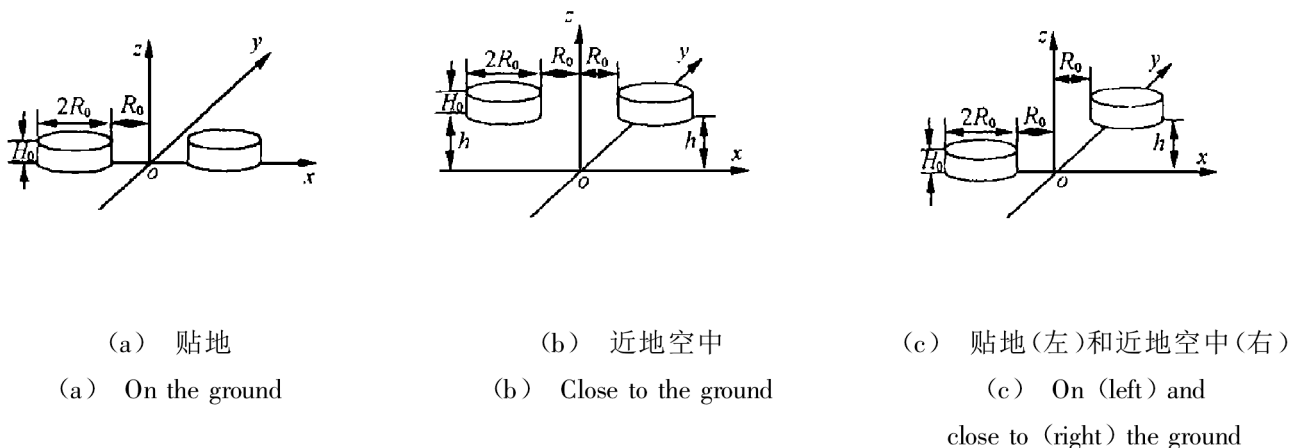


图1 爆源位置示意图

Fig.1 Schematic of explosion sources

3.1 贴地两爆源爆炸场的相互作用

图2(a)、(b)给出了过爆源轴线截面和地面的压力等值线分布。与二维轴对称爆源计算^[6]结果类似,冲击波向外传播,稀疏波自圆柱上、下底面和侧面交线处向爆源中心传播,随计算时间的推进,冲击波和稀疏波在传播过程中,忘却原爆源的几何特征(圆柱形),压力等值线近似为半球形。在对称面附近,左、右爆源产生冲击波相互透射后沿原方向继续传播,在冲击

波交线处出现很短的马赫杆。稀疏波在爆源中心反射后，自爆源中心追赶第一道冲击波，在某位置产生向爆源中心传播的冲击波，该冲击波和前面提到的透射冲击波发生相互干扰，形成图 2 所示的复杂波系结构。图 3(a)为过爆源对称轴、沿地面不同时刻的压力分布，结果显示了右爆源附近区域冲击波、稀疏波的传播过程。当 $t < 0.7657$ 时，图中曲线表明了稀疏波自外向内(爆源中心)传播。反射后的稀疏波继续追赶同向传播的冲击波，在某位置形成反向传播的冲击波。当 $t = 1.2133$ 时，该冲击波在爆源中心反射，然后远离爆源中心继续传播(图中 $t = 1.6197$)，这与图 2 的等压线结果是一致的。图 3(b)中 $x = 0, 2R_0, 3R_0$ 点, $p-t$ 曲线均出现两个峰值压力，其中 $x = 0$ 点为两同时到达冲击波的迭加。这表明，爆炸场的某些区域(如两爆源间)，经历了冲击波的多次“横扫”。因此，合理配置爆源，可实现对目标的多次作用，达到更好的破坏和杀伤效果，这也是多爆源较单爆源具有的优点。

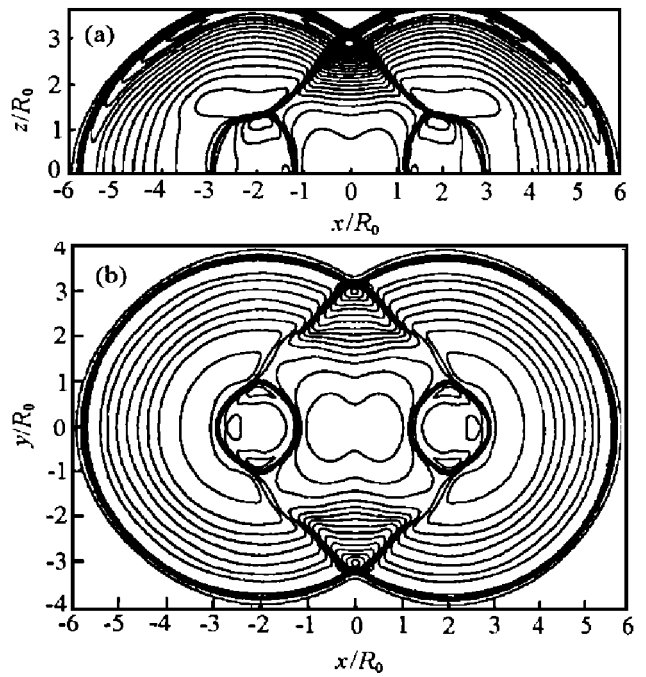


图 2 贴地两爆源爆炸场的压力等值线 ($t = 1.6197$)

Fig.2 Pressure contours of explosion sources on the ground

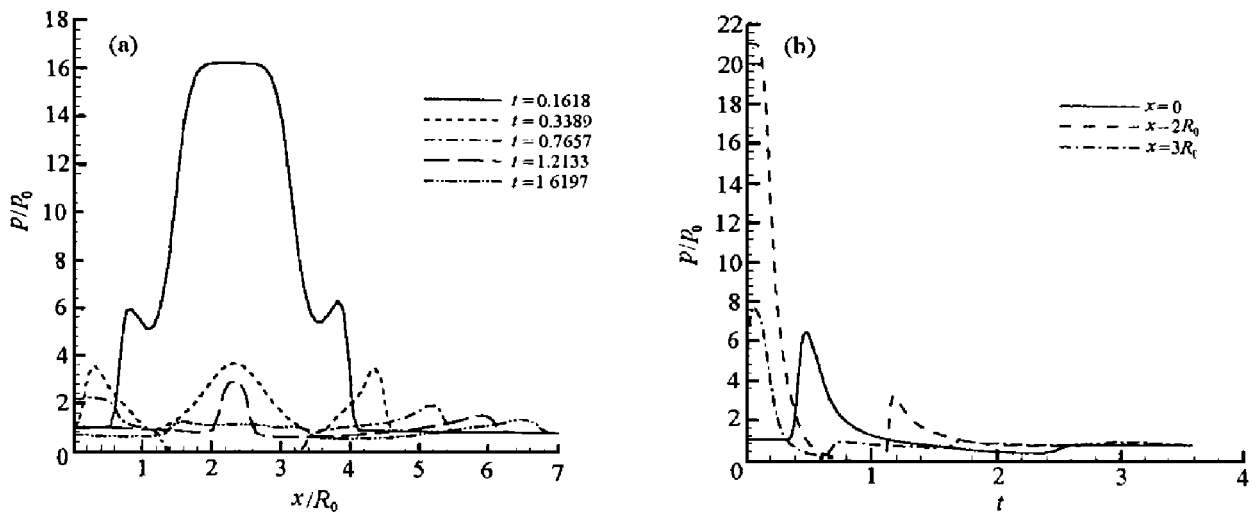


图 3 地面压力分布和典型点压力时间曲线

Fig.3 Pressure distribution on the ground and pressure time history at specified points

3.2 近地空中两爆源爆炸场的相互作用

近地空中两爆源位置如图 1(b)所示，两爆源底面离地高度均为 $h = 2H_0$ 。图 4 为过两爆源对称轴的压力等值线分布。从图中看出：当 $t = 0.3648$ 时，左、右两爆源产生的向外传播的冲击波为鼓形，此时还保留着爆源几何特性的影响，向对称面传播的冲击波还未相互干扰。在爆源下方，冲击波已到达地面并开始反射，反射冲击波还未离开地面。当 $t = 0.7378$ 时，反射冲击波离开地面向上运动，左、右传播的冲击波在对称面附近相互透射，透射后的冲击波沿原方向继续传播。同时，反射点联系的三激波系统也在对称面上发生相互作用。由于反射冲击

波和稀疏波的相互作用,在反射点(实际上为圆弧)附近形成复杂的冲击波系(图中的四个卵形结构)。当 $t=1.1874$ 时,靠近对称面的反射三激波系统相互透射,出现清晰的马赫杆。沿地面向外侧传播的反射冲击波系统也由规则反射变为马赫反射,地面上压力等值线分布表明,马赫杆在地面上的轨迹为两个交叉的圆(限于篇幅,略去图像)。该时刻的波系结构远比近地空中单爆源爆炸波遇地反射复杂^[7]。当 $t=1.6966$ 时,透射后的马赫反射三激波系统与爆源中心的稀疏波相互干扰,马赫反射的波系结构被耗散。还考察了离地不同高度两圆柱形爆源的爆炸场效应。图5给出了过两爆源对称轴和地面交线上指定点的压力时间曲线。 h 为 H_0 、 $2H_0$ 、 $6.5H_0$ 时,地面 $x=0$ 的点 $p-t$ 曲线的压力峰值分别为 8.26、8.34、5.68。 $x=2R_0$ (右爆源中心在地面的投影)的压力峰值分别为 22.70、24.06、5.43,前两个峰值压力均超过爆源压力,约为后一个峰值压力的4倍。这表明,爆源离地高度是影响云雾爆炸后地面压力分布和大小的关键参数。图5的曲线都出现两个峰值压力,表明该点受到两次冲击波的作用。随着计算时间的推进,冲击波作用区域的压力值最终恢复到大气压。

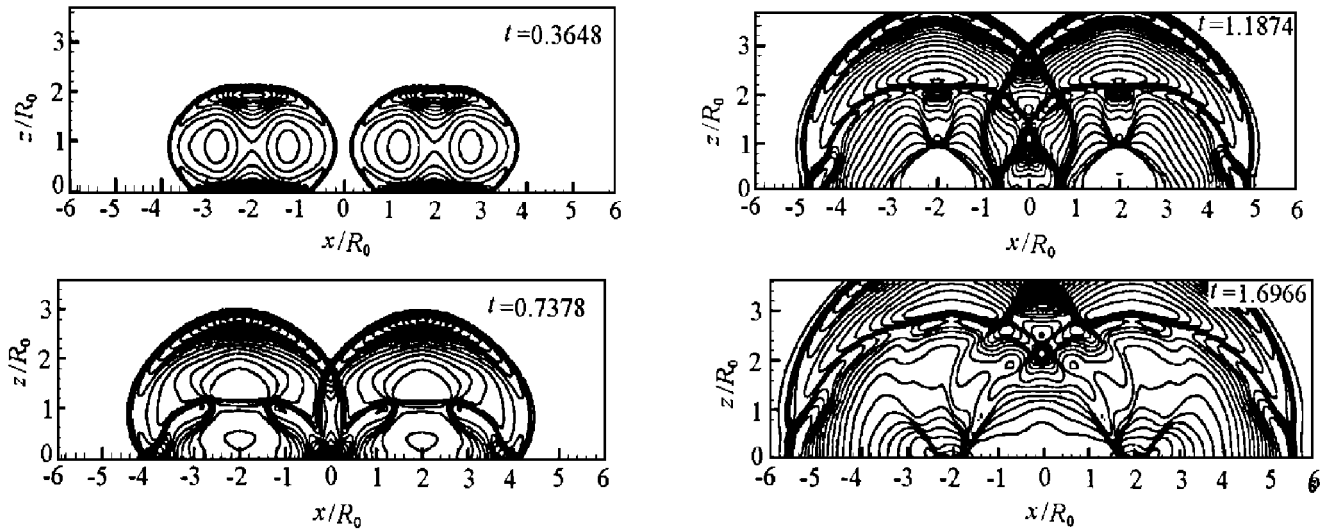


图4 近地空中两爆源的爆炸场压力等值线

Fig.4 Pressure contours of two explosion sources close to the ground

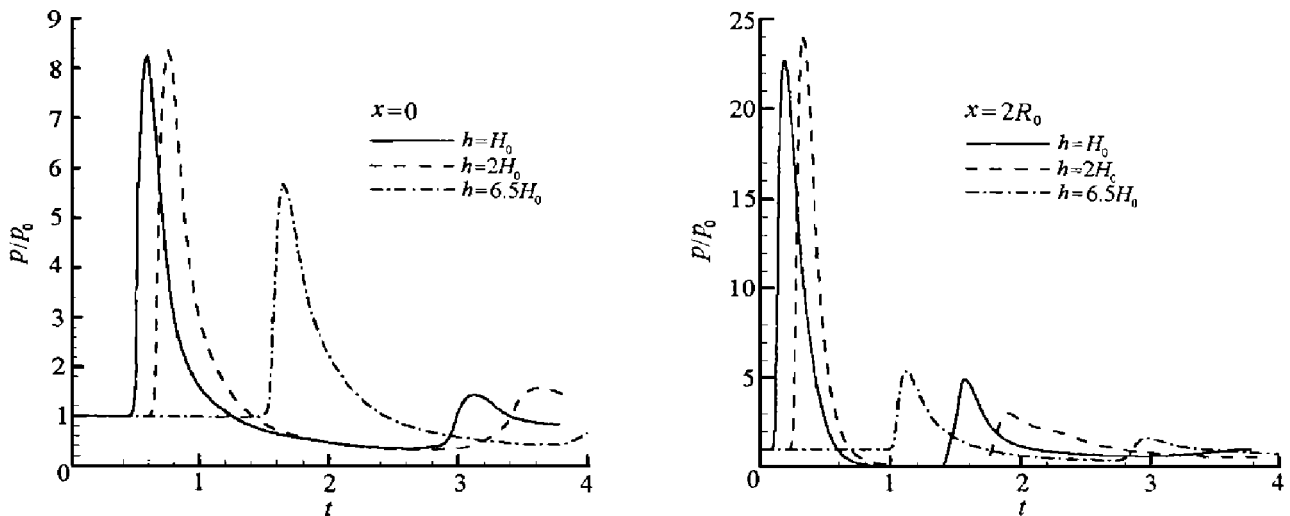


图5 沿地面指定点的压力曲线

Fig.5 Pressure time history at specified points on the ground

3.3 贴地、近地空中两爆源爆炸场的相互作用

贴地(左)和近地空中(右)两爆源位置如图 1(c)所示。图 6 给出了爆源爆炸后、过两爆源对称线的压力等值线图。结果表明,爆源的不对称性造成了得到的爆炸场也是不对称的。从图 6(a)中可清楚地看出两爆源爆炸产生的第一道冲击波,右边爆源爆炸后冲击波遇地面形成的马赫反射,这两个三激波系统分别向左、右传播。左行的马赫反射系统与左爆源中心附近的冲击波相互作用,透射后沿原方向继续传播(图 6(b))。反射冲击波和左爆源产生的右行冲击波相互作用,相互透射后仍沿原方向继续传播(图 6(a))。冲击波波系结构较贴地情况复杂,较近地空中的情况简单。计算结果还表明:过爆源对称轴、沿地面指定点($x = -2R_0, 0, 2R_0$)的 $p-t$ 曲线均出现双冲击波。表明在爆炸场的某些区域,仍存在冲击波的多次作用(略去图像)。

上述计算结果可制作成动画显示,可对模拟的爆炸场进行定量分析。

4 结 论

(1)本文的算法和开发的软件可以模拟三维、不同形状、不同爆源参数的多爆源云雾爆炸场的相互作用,得到描述爆炸场波系结构的压力等值线、任意点压力时间曲线和不同时刻沿任一直线的压力分布,计算结果的动画显示可对多爆源爆炸场进行综合分析。

(2)计算结果表明:多爆源爆炸产生的冲击波相互作用和波系结构极为复杂,爆炸场中存在冲击波、稀疏波、地面反射波以及接触面的复杂相互作用。计算结果依赖爆源形状、大小、位置、个数和爆源本身的参数。爆炸场的某些区域存在冲击波的多次作用。就云爆武器而言,合理地布置爆源,可达到最佳的破坏和杀伤效果。

进一步的研究需考虑爆源有限能量释放速率,并与实验结果作对比。

参考文献:

- [1] 徐胜利,糜仲春,汤明钧.近地空中两爆源爆炸场相互作用数值模拟[J].实验力学,1996,11(1):39.
- [2] Uenishi K, Rogers R C. Three-dimensional Computation of Mixing of Transverse Injector in a Ducted Supersonic Air-stream [R]. AIAA Paper 86-1423, 1986.
- [3] Yee H C, Klopper G H, Montagne J L. High-resolution Shock-capturing Schemes for Inviscid and Viscous Hypersonic Flows [J]. J Comp Phys, 1990, 88: 31.
- [4] 徐胜利,刘家骢,刘荣海,等.燃料空气炸药(FAE)爆炸场的研究[J].实验力学,1995,10(3):203.

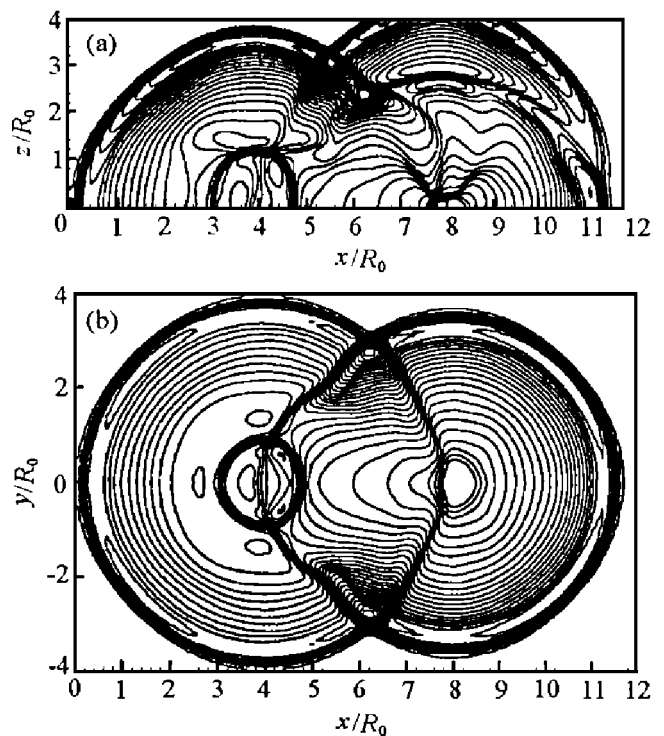


图 6 贴地、近地两爆源爆炸场的压力等值线
($t = 1.6152$)

Fig. 6 Pressure contours of explosion sources on and close to the ground

- [5] Gordon S, McBride B J. Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket Performances, Incident and Reflected Shocks, and Chapman-Jouguet Detonation[R] .NASA SP-273, 1971.
- [6] 徐胜利, 糜仲春, 汤明钧. 贴地无约束可燃气云爆炸场的数值模拟[J] . 中国科技大学学报, 1996, 11: 182.
- [7] 徐胜利, 汤明钧, 糜仲春. 近地空中气云爆炸波遇地面反射研究[J] . 爆炸与冲击, 1996, 16(4): 298.

Three Dimensional Computation on the Interaction of Blast Waves Generated by Multi-sources of FAE

XU Sheng-li¹, YUE Peng-tao¹, PENG Jin-hua²

(1. *University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(2. *Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

Abstract: Upwind TVD scheme is used to solve the 3D fully N-S equations which describe explosion field generated by the fuel air explosives (FAE). The studies are done on three specified locations of the FAE sources that are close to or on the ground. The propagation and interaction of the blast waves produced by each explosion source can be shown clearly from the pressure contours. The pressure time history at any point and the pressure distribution at any time in the explosion field can be determined by numerical simulation in this paper. The slide shows of the pressure distribution is helpful to evaluate the overpressure distribution.

Key words: FAE; blast waves; numerical simulation