文章编号：1001-1455(2000)02-0097-06

FAE 爆炸波对地面目标作用的三维数值研究

岳鹏涛[1], 徐胜利[1], 彭金华[2]

(1.中国科技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：利用二阶迎风 TVD 格式, 对多组分全 N-S 方程进行全耦合数值求解, 研究了近地空中环氧丙烷(C_3H_6O)形成的圆柱形云雾爆炸波和地面作用问题, 得到了对目标作用前、后冲击波的传播和波系结构的演化以及不同时刻爆源组分的分布。对目标表面计算单元的压力进行面积加权平均, 得到目标各表面平均超压随时间变化的曲线。压力值的动画显示表明了目标表面所受载荷的大小和分布随时间变化的规律。修改初、边值条件, 本文的方法和开发的软件可对任意形状云雾爆炸波与目标作用问题进行综合数值分析。

关键词：燃料空气炸药(FAE); 冲击波; 数值模拟

中图分类号：O354.5; O643.2; V211.3 文献标识码：A

1 引 言

云爆武器是利用高能炸药将易挥发的碳氢燃料(如环氧丙烷等)抛散在空气中, 形成可燃云雾即燃料空气炸药(FAE), 起爆云雾, 达到破坏和杀伤的目的。与理想爆源相比, FAE 为典型的非理想爆源, 即有限的能量释放速率和爆源体积。与常规武器相比, FAE 爆炸波作用的面积大、时间长, 超压不高但冲量大, 是一类新的常规武器[1]。由于 FAE 野外试验费用高、测试较困难, 所以公开的文献报道很少。徐胜利[2]曾对圆柱形 FAE 爆炸波与环形障碍物作用进行过二维数值模拟。在假设爆炸波为平面波的前提下, 王惠铃[3]曾对运动激波和物体作用作过二、三维数值模拟, 由于爆炸波过于简化、三维计算结果不太好。我们认为爆源中的环氧丙烷(C_3H_6O)与空气中的 O_2 完全反应, 产物为高温、高压的 CO_2 和 H_2O(包括惰性剂 N_2), 忽略稀疏波引起 H_2O 的相变(凝结), 采用实验测得的爆源参数和云雾尺寸, 对 FAE 爆炸波与目标作用这一典型问题进行三维数值研究, 目的是搞清冲击波与目标作用前后的波系结构及其演化、目标表面承受载荷的大小及分布, 也为实验数据提供参考和比较。

2 控制方程和数值方法

2.1 控制方程

FAE 燃料抛撒时, 受驱动的液态环氧丙烷(C_3H_6O)向外作高速运动, 并发生破碎和雾化, 与空气产生强烈的掺混, 形成的云雾形状近似为轴对称的[4]。在起爆云雾前, 云雾的形状、体

* 收稿日期：1999-03-26; 修订日期：1999-10-12
基金项目：中国科学院重点项目资助(TS9607-2)。
作者简介：岳鹏涛(1976—), 男, 博士研究生。

积基本保持不变,由于 C_3H_6O 的挥发性较强,可认为云雾中的 C_3H_6O 已完全气化,并与空气中的 O_2 发生下列完全反应

$$C_3H_6O + 4O_2 + 15.05N_2 \rightarrow 3CO_2 + 3H_2O + 15.05N_2$$

整个爆炸场(空气和爆源产物)共包含 CO_2、H_2O、O_2、N_2 四个组分。在直角坐标系中,可用如下控制方程描述

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}_g}{\partial t} + \frac{\partial \boldsymbol{E}_g}{\partial x} + \frac{\partial \boldsymbol{F}_g}{\partial y} + \frac{\partial \boldsymbol{G}_g}{\partial z} = \frac{\partial \boldsymbol{E}_{g,v}}{\partial x} + \frac{\partial \boldsymbol{F}_{g,v}}{\partial y} + \frac{\partial \boldsymbol{G}_{g,v}}{\partial z} \tag{1}$$

式中:

$$\boldsymbol{U}_g = (\rho^1, \rho^2, \cdots, \rho^{ns}, \rho u, \rho v, \rho w, E)^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{E}_g = (\rho^1 u, \rho^2 u, \cdots, \rho^{ns} u, \rho u^2 + p, \rho uv, \rho uw, u(E+p))^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{F}_g = (\rho^1 v, \rho^2 v, \cdots, \rho^{ns} v, \rho vu, \rho v^2 + p, \rho vw, v(E+p))^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{G}_g = (\rho^1 w, \rho^2 w, \cdots, \rho^{ns} w, \rho wu, \rho wv, \rho w^2 + p, w(E+p))^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{E}_{g,v} = (\rho D c_x^1, \rho D c_x^2, \cdots, \rho D c_x^{ns}, \tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz} + q_x)^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{F}_{g,v} = (\rho D c_y^1, \rho D c_y^2, \cdots, \rho D c_y^{ns}, \tau_{yx}, \tau_{yy}, \tau_{yz}, u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz} + q_y)^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{G}_{g,v} = (\rho D c_z^1, \rho D c_z^2, \cdots, \rho D c_z^{ns}, \tau_{zx}, \tau_{zy}, \tau_{zz}, u\tau_{zx} + v\tau_{zy} + w\tau_{zz} + q_z)^{\mathrm{T}}$$

$\boldsymbol{E}_g$、$\boldsymbol{F}_g$、$\boldsymbol{G}_g$ 和 $\boldsymbol{E}_{g,v}$、$\boldsymbol{F}_{g,v}$、$\boldsymbol{G}_{g,v}$ 为对应 $\boldsymbol{U}_g$ 的无粘和粘性矩阵,下标 g、v 分别表示气相和粘性,ns 为组分数(文中 $ns=4$),ρ^i、c^i、ρ 为组分 i 的密度、质量分数和总密度,c_x^i、c_y^i、c_z^i 为 c^i 的梯度沿 x、y、z 的分量,D、E 为质量扩散系数和单位体积总能,其它为通常意义的物理量。热流 $\vec{q}$ 的表达式为

$$\begin{cases} q_x = \bar{c}_p \left(\dfrac{\mu_1}{Pr_1} + \dfrac{\mu_t}{Pr_t}\right) \dfrac{\partial T}{\partial x} + \sum\limits_{i=1}^{ns} \rho D h_i \dfrac{\partial c^i}{\partial x} \\ q_y = \bar{c}_p \left(\dfrac{\mu_1}{Pr_1} + \dfrac{\mu_t}{Pr_t}\right) \dfrac{\partial T}{\partial y} + \sum\limits_{i=1}^{ns} \rho D h_i \dfrac{\partial c^i}{\partial y} \\ q_z = \bar{c}_p \left(\dfrac{\mu_1}{Pr_1} + \dfrac{\mu_t}{Pr_t}\right) \dfrac{\partial T}{\partial z} + \sum\limits_{i=1}^{ns} \rho D h_i \dfrac{\partial c^i}{\partial z} \end{cases} \qquad \rho D = \frac{\mu_1}{Pr_1} + \frac{\mu_t}{Pr_t},\ Le = 1$$

式中 h_i 为组分 i 的比焓。Pr_1 和 Pr_t 分别为层流和湍流的 Prandtl 数,取 0.72 和 0.9,我们仅考虑层流。以初始时刻云雾半径和静止空气参数为无量纲参数,云雾平均半径为 6m,取静止空气的声速为无量纲速度,求得无量纲化时的参考时间 $t_0=17.28$ms。在变换域(τ, ξ, η, ζ)中,方程(1)的无量纲形式为

$$\frac{\partial \hat{\boldsymbol{U}}_g}{\partial \tau} + \frac{\partial \hat{\boldsymbol{E}}_g}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{\boldsymbol{F}}_g}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{\boldsymbol{G}}_g}{\partial \zeta} = \frac{1}{Re}\left(\frac{\partial \hat{\boldsymbol{E}}_{g,v}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{\boldsymbol{F}}_{g,v}}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{\boldsymbol{G}}_{g,v}}{\partial \zeta}\right) \tag{2}$$

2.2 数值方法

方程(1)的二阶迎风 TVD 格式为

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{U}}^{n+1}_{g,i,j,k} = {} & \hat{\boldsymbol{U}}^{n}_{g,i,j,k} - \\ & \frac{\Delta\tau}{2\Delta\xi}\Big[(\hat{\boldsymbol{E}}^n_{g,i+1,j,k} - \hat{\boldsymbol{E}}^n_{g,i-1,j,k}) + (R^n_{i+1/2,j,k}\phi^n_{i+1/2,j,k} - R^n_{i-1/2,j,k}\phi^n_{i-1/2,j,k}) - \\ & \frac{1}{Re}(\hat{\boldsymbol{E}}^n_{g,v,i+1,j,k} - \hat{\boldsymbol{E}}^n_{g,v,i-1,j,k})\Big] - \frac{\Delta\tau}{2\Delta\eta}\Big[(\hat{\boldsymbol{F}}^n_{g,i,j+1,k} - \hat{\boldsymbol{F}}^n_{g,i,j-1,k}) + (R^n_{i,j+1/2,k}\phi^n_{i,j+1/2,k} - \end{aligned}$$

$$R^n_{i,j-1/2,k}\phi^n_{i,j-1/2,k}) - \frac{1}{Re}(\hat{\boldsymbol{F}}^n_{g,v,i,j+1,k} - \hat{\boldsymbol{F}}^n_{g,v,i,j-1,k})] - \frac{\Delta\tau}{2\Delta\zeta}[(\hat{\boldsymbol{G}}^n_{g,i,j,k+1} -$$

$$\hat{\boldsymbol{G}}^n_{g,i,j,k-1}) + (R^n_{i,j,k+1/2}\phi^n_{i,j,k+1/2} - R^n_{i,j,k-1/2}\phi^n_{i,j,k-1/2}) - \frac{1}{Re}(\hat{\boldsymbol{G}}^n_{g,v,i,j,k+1} - \hat{\boldsymbol{G}}^n_{g,v,i,j,k-1})]$$

ϕ 的求法见文献[5]，采用全耦合方式求解。

2.3　混气的热力学参数

状态方程和气体常数　$p = \rho RT = \sum_{i=1}^{ns} p_i = \sum_{i=1}^{ns} \rho_i R_i T, \quad R = \sum_{i=1}^{ns} c^i R_i$

组分定压比热　$c_{pi} = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4$

式中：a_0、a_1、a_2、a_3 和 a_4 对应高温和低温两组值，由文献[6]中的 JANAF 表确定。

混合气体定压比热和比热比　$\bar{c}_p = \sum_{i=1}^{ns} c^i c_{pi}, \quad \gamma = \bar{c}_p / (\bar{c}_p - R)$

2.4　初、边值条件

初始时刻，给定实验测得的云雾尺寸和爆源参数，产物气体处于静止状态，按完全反应模式，可确定爆炸场所有组分的浓度。由实验[4]知，45kg 环氧丙烷弹形成的云雾形状近似为圆柱形(此处高 H_0=3m、截面半径 R_0=6m)，测得爆炸后燃气平均温度比、压力比分别为 T_2/T_1=7.778、p_2/p_1=24.307。下标 1、2 分别表示空气和爆源。

沿地面和目标表面取无粘条件，对称轴取对称条件，其它边界取对流条件。

3　计算结果和讨论

我们研究近地空中圆柱形 FAE 爆炸波对地面目标的作用，爆源和目标的位置如图 1 所示。取图 1 的 1/4($x, y, z > 0$)为计算域，网格取 78×78×78。所研究的目标的四个表面分别为迎风面($x = L$)，背风面($x = L + L_1$)，侧面($y = L_2/2$)和上表面($z = L_3$)。

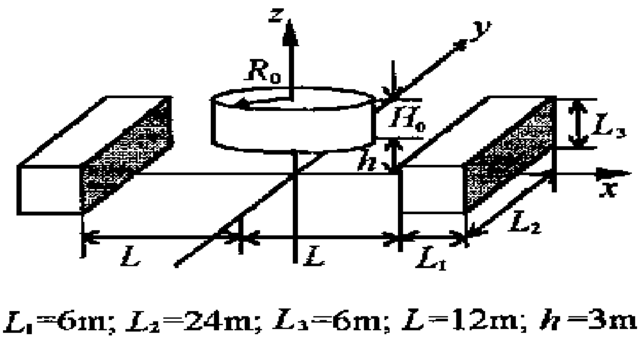

图 1　爆源和目标的相对位置

Fig.1　Schematic positions of FAE sources and targets

图 2 给出了不同时刻爆炸场的压力等值线分布，图中 t 为无量纲时间(下同)。图 2(a)表明：爆源冲击波已达到目标的迎风面，首先在迎风面和 xoz 平面交线上反射，图中可清楚地看出该处的反射冲击波。冲击波在地面上的反射为规则反射(RR)，反射冲击波在中心处有一平台(类似于平面激波，见 xoz 和 yoz 平面等值线)。稀疏波紧追冲击波向前传播。图 2(b)表明：在目标迎风面，反射冲击波已离开目标表面向爆源中心传播，沿目标上表面的冲击波已扫过部分区域，原爆源冲击波在地面上已形成 Mach 反射(MR，见 yoz 平面等值线)，出现清晰的 Mach 杆。图 2(c)表明：原爆源冲击波将要扫过目标的上表面，Mach 杆也绕到目标的侧面。从图 2(d)看出，原爆源冲击波已绕过目标的上表面，到达背风面的绕射波已扫过背风面的部分区域，迎风面的反射冲击波快要到达对称面 yoz。图 2(e)表明：原爆源冲击波已绕过目标所有表面，在地面上反射的 Mach 杆变得更长，部分迎风面反射冲击波经对称面反射后又向目标传播(该反射波仍为三维结构)，其余部分继续向对称面传播。图 2(f)表明：对称面的反射冲击波即将到达迎风面，绕过目标的冲击波继续向前传播，此时冲击波形状为非半球形。进一步的计算表明：随着计算时间的推进，冲击波形状最终变为半球形。

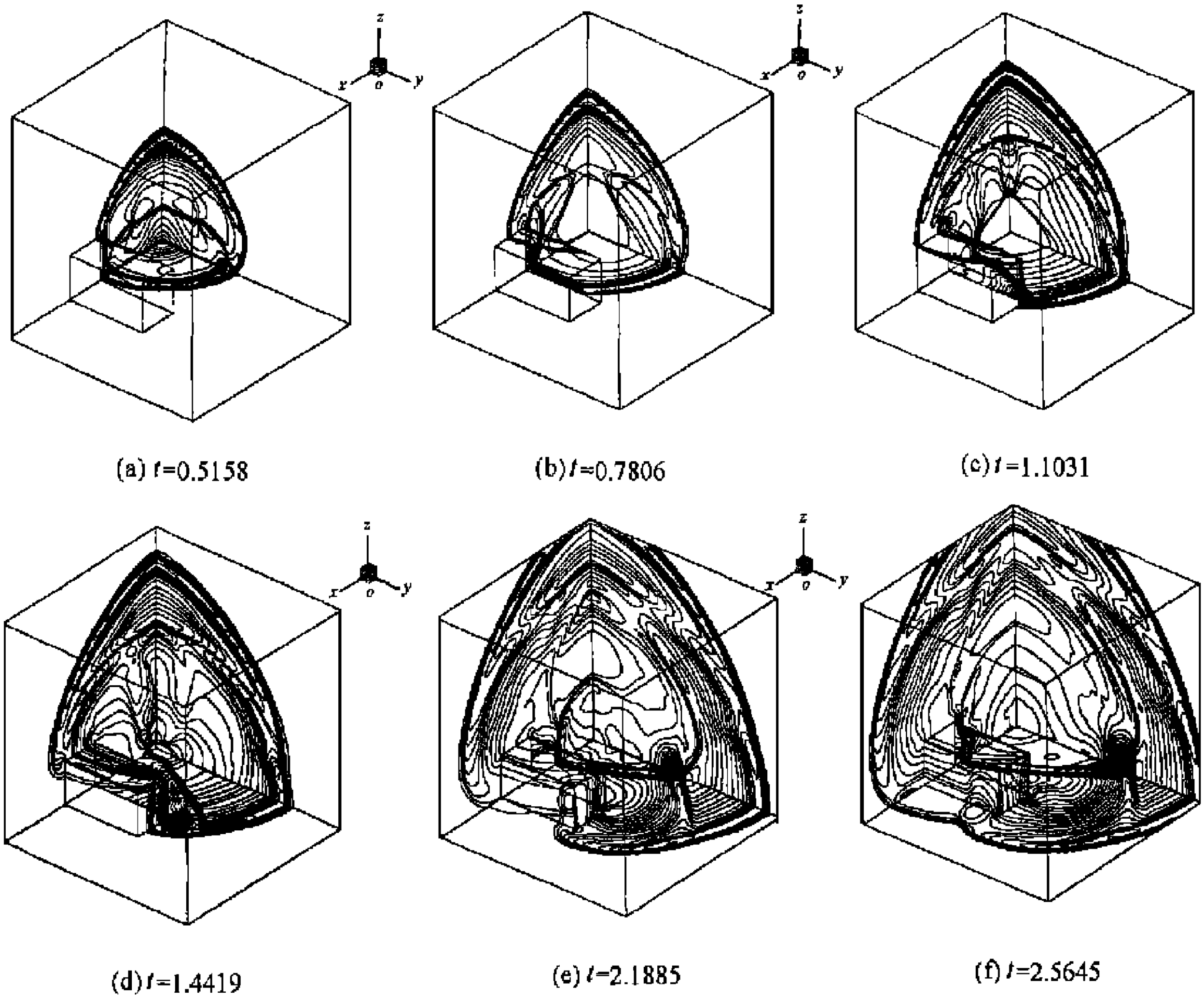

图 2　不同时刻爆炸场压力等值线分布(爆源为多组分气体)

Fig.2　Pressure contours in the case of multi-species exhaust gas

图 3 给出两个不同时刻 CO_2 的等密度线分布。结果表明:爆炸产物对于冲击波具有跟随作用,但不能充满冲击波扫过的空间,原因是反射冲击波造成接触间断面的滞止,产物很难到达目标和地面的表面。等密度线较浓的地方为三维冲击波后的接触面即产物和空气的分界面。若将爆源简化为相同压比和温度比的空气,图 4 给出了与图 2(f)相近时间的压力等值线。比较发现:两图所反应的冲击波系是基本一致的。因此,将爆源作上述简化代替包含多组分的混合物,压力场差别不大,可满足工程计算的要求,但计算量要小得多。为定量了解目标面载荷的大小,将目标各表面计算单元上超压进行迭加,除以表面面积,可得到目标迎风面、背风面、侧面和上表面的平均超压值随时间的变化(图 5 所示)。结果表明:迎风面(p_{x1})、背风面(p_{x2})、侧面(p_y)和上表面(p_z)所受超压的最大值分别为 0.304MPa、0.013MPa、0.027MPa、0.045MPa,对应的无量纲时间 t 分别为 0.81116、2.4351、1.7237、1.4679。目标迎风面所受压力载荷最大、载荷上升速率也最大;背风面超压随时间上升最缓慢、幅值也小。压力计算值的动画显示可以确定目标表面不同时刻超压大小的分布,受篇幅限制,此处不再列出图线。要说明的是:FAE 爆炸波对地面目标作用的实验研究尚需开展,特别是有关爆炸场组分的测量。因此,本文中的数值方法、数值结果和相应的实验结果对比需作进一步的工作。

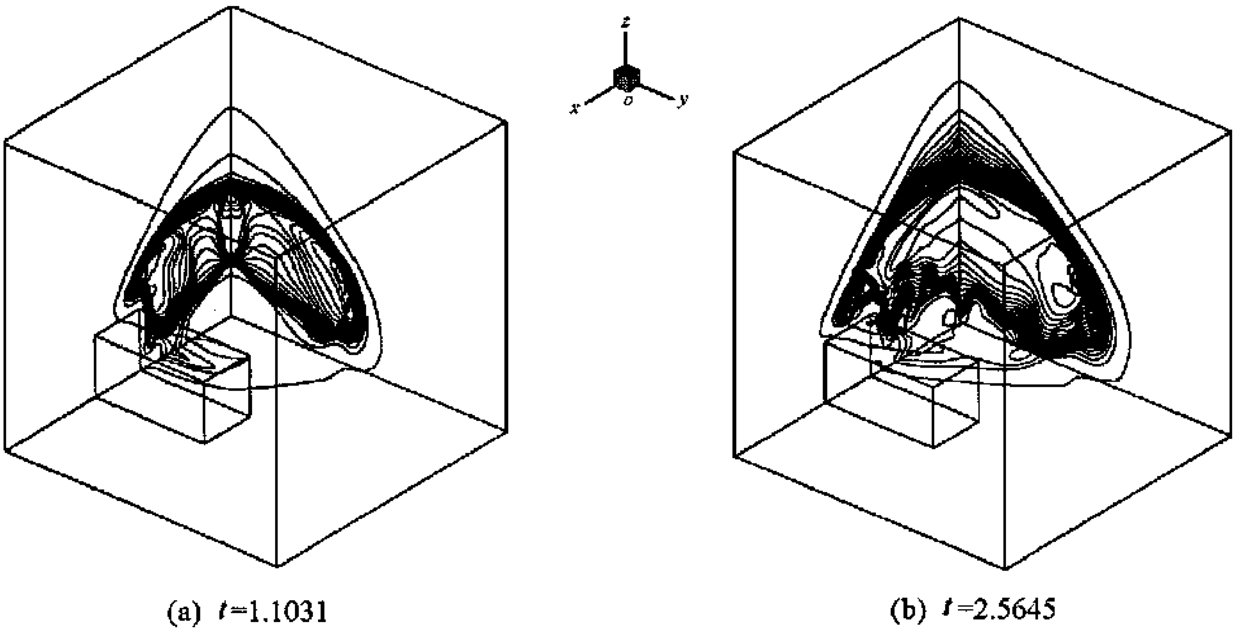

图 3　CO_2 的等密度线分布

Fig.3　Density distribution of CO_2

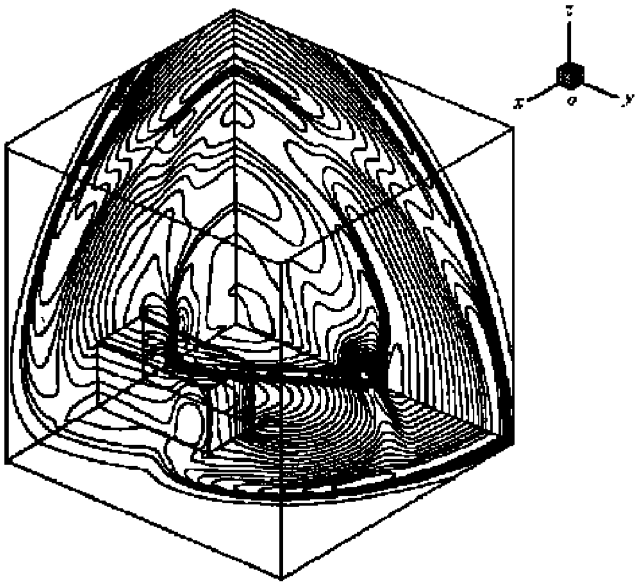

图 4　压力等值线的分布(爆源为空气，$t=2.5863$)

Fig.4　Pressure contours in the case of exhaust air at high temperature

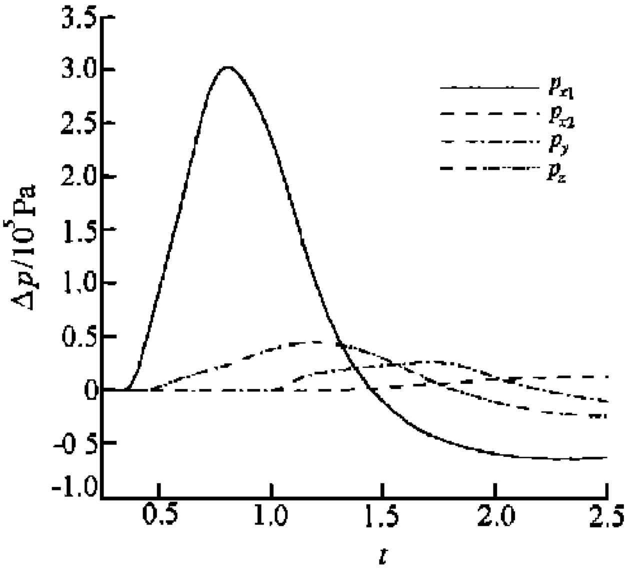

图 5　目标超压随时间的变化

Fig.5　Average overpressures on different surfaces of the target

4　结　论

(1) 本文的结果表明了 FAE 爆炸波与目标作用前后的冲击波传播和演化的过程、爆源气体组分的分布、目标各表面所受平均载荷的大小和随时间的变化关系，从压力值的动画显示可了解目标表面任意点、任意时刻载荷大小和分布。计算结果依赖于爆源和目标的形状、大小、位置和爆源本身的参数。

(2) 给定云雾和目标的形状、位置、爆源参数，重新生成网格，修改初、边值条件，本文的算法和开发的软件可对任意 FAE 爆炸波与目标作用问题进行综合分析。

参考文献：

[1] 许会林.燃料空气炸药[M].北京：国防工业出版社，1980.

[2] 徐胜利.无约束可燃气云雾爆炸场的数值模拟和实验研究[D].南京：南京理工大学，1994.

[3] 王惠玲，乐嘉陵.数值模拟运动激波对物体的冲击效应[A].第八届全国激波和激波管学术交流会议论文集[C].北京：中国科学院力学研究所，1998.

[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.

[5] Yee H C, Klopeer G H, Montagne J L. High-resolution Shock-Capturing Schemes for Inviscid and Viscous Hypersonic Flows[J]. J of Computational Physics, 1990, 88: 31.

[6] 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.

3D Numerical Simulations on the Interaction between FAE Blast Waves and Ground Targets

YUE Peng-tao[1], XU Sheng-li[1], PENG Jin-hua[2]

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

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

Abstract: The Second order upwind TVD scheme was used to solve the three dimensional complete Navier-Stokes equations coupled with multi-species equations. The interactions between FAE blast waves and ground targets were simulated using the above method. The numerical results clearly show blast wave propagation, the evolution of shock structures and distributions of exhaust multi-species. The weighted pressure time history in each element was used to deduce the average overpressure variation on target surface. The animated slides of the computed pressure show the loading distribution at different time. The approach and software developed in this paper can be used to predict the interactions between groud targets and blast waves generated by FAE in arbitrary shapes.

Key words: fuel air explosive (FAE); blast wave; numerical simulation