DOI: 10.11883/1001-1455(2016)05-0603-08

基于 CE/SE 方法模拟空气中 RDX-Al 悬浮粉尘的两相爆轰*

咎文涛[1,2],洪 滔[2],董贺飞[2]
(1.北京理工大学,北京 100081;
2.北京应用物理与计算数学研究所,北京 100094)

摘要:通过 CE/SE 方法模拟了空气中炸药-铝粉尘的两相爆轰过程,研究了双粉尘爆轰过程中粒子不同密度对爆轰波速度、压力的影响,得到密度与波速、爆压间的线性关系。模拟得到悬浮粉尘在复杂通道中的爆轰波传播过程,研究了双粉尘爆轰的流场演化过程,选取流场中的一些点对该处流场的压力及温度随时间的变化进行重点研究,对比了单铝粉尘在同种条件下的爆轰过程,发现双粉尘爆轰明显提高了爆轰波波速和流场的压力及温度。模拟结果表明 CE/SE 方法可以成功模拟双粉尘的爆轰过程,可为多粉尘爆轰的研究提供参考。

关键词:爆炸力学;粉尘爆轰;CE/SE;悬浮炸药-铝粉尘
中图分类号:O381 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

温压弹作为一种非常规武器,具有耐高温高压、作用时间长、作用范围广等优点。在对固体云爆剂的研究中,铝作为一种质轻含能高的金属被广泛采用,因此对于炸药粉尘铝粉尘等多种粉尘形成的两相爆轰过程发展及传播的研究具有极其重要的意义。含铝复合装药具有爆温爆压高、作用范围广的优点[1];陈朗等[2]研究了铝粉尘尺寸对于爆炸性能的影响,发现了小尺寸粉尘作用时间短放能快;洪滔等[3]数值模拟了炸药颗粒与铝颗粒混合粉尘的双波阵面爆轰,分析对比了双颗粒与单颗粒爆轰的爆轰波参数。

爆轰模拟过程中最重要的是捕捉强间断问题,近些年发展出了一系列的格式方法,例如 TVD 格式、ENO 格式、WENO 格式、BGK 格式和 RKDG 格式等。CE/SE(时-空守恒元解元)方法是一种解双曲守恒方程的新方法,它在概念和方法上都不同于已有的方法[4],将时间和空间作为一个整体统一对待,使得从整体和局部都满足守恒律。Y. Wu 等[5]将这种方法拓展应用到化学反应流。董贺飞等[6]应用 CE/SE 方法模拟了 RDX 颗粒在空气中的爆轰问题。

本文中应用 CE/SE 方法并采用两相流模型,分析颗粒不同密度对爆轰速度的影响,并研究 RDX 颗粒和铝颗粒悬浮粉尘在复杂通道中的爆轰过程。

1 数值方法及爆轰模型

时-空守恒元解元方法[4,7-8]与传统差分方法相比,具有构造简单、格式精度高、分辨率较高等特点。对于二维守恒方程组:

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\frac{\partial E(U)}{\partial x}+\frac{\partial F(U)}{\partial y}=0 \tag{1}$$

CE/SE 求解区域模型如图 1 所示,图中 A、B、C、D 和 P 为记录物理量的网格点,P 为在 x-y 平面的投影,与 A、B、C、D 相差 Δt。假设解元物理量连续,采用泰勒展开,对守恒方程进行积分,得到 CE/SE 格式,计算格式如下:

* **收稿日期**:2015-02-10;**修回日期**:2016-01-20
第一作者:咎文涛(1988—),男,博士研究生;**通信作者**:洪 滔,hongtao@iapcm.cn。

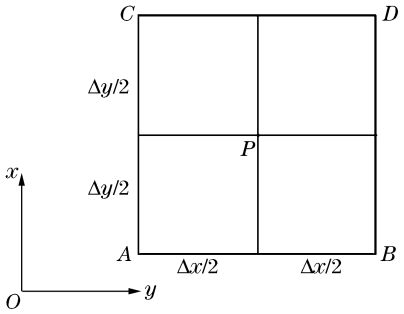

图 1 CE/SE 求解区域模型

Fig. 1 CE/SE area model

$$U=\frac{1}{4}\left(\bar{U}+\frac{\Delta t}{\Delta x}\bar{E}+\frac{\Delta t}{\Delta y}\bar{F}\right) \tag{2}$$

式中：

$$\bar{U}=U\left(\frac{\Delta x}{4},\frac{\Delta y}{4},0\right)_A+U\left(-\frac{\Delta x}{4},\frac{\Delta y}{4},0\right)_B+U\left(-\frac{\Delta x}{4},-\frac{\Delta y}{4},0\right)_C+U\left(\frac{\Delta x}{4},-\frac{\Delta y}{4},0\right)_D \tag{3}$$

$$\bar{E}=E\left(0,\frac{\Delta y}{4},\frac{\Delta t}{4}\right)_A-E\left(0,\frac{\Delta y}{4},\frac{\Delta t}{4}\right)_B-E\left(0,-\frac{\Delta y}{4},\frac{\Delta t}{4}\right)_C-E\left(0,-\frac{\Delta y}{4},\frac{\Delta t}{4}\right)_D \tag{4}$$

$$\bar{F}=F\left(0,\frac{\Delta y}{4},\frac{\Delta t}{4}\right)_A-F\left(0,\frac{\Delta y}{4},\frac{\Delta t}{4}\right)_B-F\left(0,-\frac{\Delta y}{4},\frac{\Delta t}{4}\right)_C-F\left(0,-\frac{\Delta y}{4},\frac{\Delta t}{4}\right)_D \tag{5}$$

其中 $H(\Delta x,\Delta y,\Delta t)=H+H_X\Delta x+H_y\Delta y$（$H=U,E,F$）为物理量的泰勒展开。

物理量偏导数为：

$$U_I=\frac{|U_I^-|^\alpha U_I^+ + |U_I^+|^\alpha U_I^-}{|U_I^-|^\alpha + |U_I^+|^\alpha} \tag{6}$$

式中：$I=x,y$；$\alpha=1\sim 2$；U_I^-，U_I^+ 为在相应方向上的左右导数，对其采用中心差分。然后带入方程得到其他物理量导数。

$$U_x^-=-\frac{U\left(0,0,\frac{\Delta t}{2}\right)_A+U\left(0,0,\frac{\Delta t}{2}\right)_B-2U_P}{\Delta x} \tag{7}$$

$$U_x^+=\frac{U\left(0,0,\frac{\Delta t}{2}\right)_C+U\left(0,0,\frac{\Delta t}{2}\right)_D-2U_P}{\Delta x} \tag{8}$$

$$U_y^-=-\frac{U\left(0,0,\frac{\Delta t}{2}\right)_A+U\left(0,0,\frac{\Delta t}{2}\right)_C-2U_P}{\Delta y} \tag{9}$$

$$U_y^+=-\frac{U\left(0,0,\frac{\Delta t}{2}\right)_B+U\left(0,0,\frac{\Delta t}{2}\right)_D-2U_P}{\Delta y} \tag{10}$$

采用 CE/SE 方法求解不含源项欧拉方程，对欧拉方程中的源项采用 4 阶龙格库塔方法求解。

模拟过程采用了两相流模型，假设颗粒为球形，初始直径都相同，颗粒的温度都是均衡的，忽略了粒子间的作用，粒子化学反应产生的能量假定都被气体吸收，气体的组分都是均匀的，略了粒子和墙壁间的热传导，忽略粒子与气体间的辐射作用，固相和气相都满足方程。

气相方程：

$$\frac{\partial\rho_1\varphi_1}{\partial t}+\frac{\partial\rho_1\varphi_1 u_1}{\partial x}+\frac{\partial\rho_1\varphi_1 v_1}{\partial y}=I_{\mathrm{a}}+I_{\mathrm{aa}} \tag{11}$$

$$\frac{\partial\rho_1\varphi_1 u_1}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_1\varphi_1 u_1^2+p)}{\partial x}+\frac{\partial\rho_1\varphi_1 u_1 v_1}{\partial y}=I_{\mathrm{a}}u_{\mathrm{a}}-F_{ax}+I_{\mathrm{aa}}u_{\mathrm{aa}}-F_{aax} \tag{12}$$

$$\frac{\partial \rho_1 \varphi_1 v_1}{\partial t}+\frac{\partial \rho_1 \varphi_1 u_1 v_1}{\partial x}+\frac{\partial(\rho_1 \varphi_1 v_1^2+p)}{\partial y}=I_a v_a-F_{ay}+I_{aa} v_{aa}-F_{aay} \tag{13}$$

$$\frac{\partial \rho_1 \varphi_1(e_1+0.5(u_1^2+v_1^2))}{\partial t}+\frac{\partial \varphi_1 u_1(\rho_1 e_1+0.5\rho_1(u_1^2+v_1^2)+p)}{\partial x}+$$
$$\frac{\partial \varphi_1 v_1(\rho_1 e_1+0.5\rho_1(u_1^2+v_1^2)+p)}{\partial y}=$$
$$-Q_a+I_a(e_a+0.5(u_a^2+v_a^2))+I_a q_{RDX}-F_{ax} u_a-F_{ay} v_a-Q_{aa}+$$
$$I_{aa}(e_{aa}+0.5(u_{aa}^2+v_{aa}^2))+I_{aa} q_{Al}-F_{aax} u_{aa}-F_{aay} v_{aa} \tag{14}$$

固相方程：

$$\frac{\partial \rho_2 \varphi_2}{\partial t}+\frac{\partial \rho_2 \varphi_2 u_2}{\partial x}+\frac{\partial \rho_2 \varphi_2 v_2}{\partial y}=-I_2 \tag{15}$$

$$\frac{\partial \rho_2 \varphi_2 u_2}{\partial t}+\frac{\partial \rho_2 \varphi_2 u_2^2}{\partial x}+\frac{\partial \rho_2 \varphi_2 u_2 v_2}{\partial y}=-I_2 u_2+F_{2x} \tag{16}$$

$$\frac{\partial \rho_2 \varphi_2 v_2}{\partial t}+\frac{\partial \rho_2 \varphi_2 u_2 v_2}{\partial x}+\frac{\partial \rho_2 \varphi_2 v_2^2}{\partial y}=-I_2 v_2+F_{2y} \tag{17}$$

$$\frac{\partial \rho_2 \varphi_2(e_2+0.5(u_2^2+v_2^2))}{\partial t}+\frac{\partial \rho_2 \varphi_2 u_2(e_2+0.5(u_2^2+v_2^2))}{\partial x}+$$
$$\frac{\partial \rho_2 \varphi_2 v_2(e_2+0.5(u_2^2+v_2^2))}{\partial y}=Q_2-I_2(e_2+(u_2{}^2+v_2^2))+F_{2x} u_2+F_{2y} v_2 \tag{18}$$

$$\frac{\partial n_2}{\partial t}+\frac{\partial n_2 u_2}{\partial x}+\frac{\partial n_2 v_2}{\partial y}=0 \tag{19}$$

组分方程：

$$\frac{\partial \rho_1 \varphi_1 y_i}{\partial t}+\frac{\partial \rho_1 \varphi_1 y_i u_1}{\partial x}+\frac{\partial \rho_1 \varphi_1 y_i v_1}{\partial y}=\omega_i \tag{20}$$

气体状态方程：

$$p=\rho R T\sum_1^m \frac{y_i}{w_i} \tag{21}$$

式中：角标 1 代表气体，2＝a，aa 分别代表 RDX 和 Al，变量 ρ 为密度，u 为横向速度，v 为纵向速度，e 为内能，p 为压力，φ（$\varphi_1+\varphi+\varphi_{aa}=1$）为体积分数，$I$ 为单位体积内颗粒的质量变化率。气体中假设存在 7 种组分，分别为 O_2、N_2、CO、CO_2、H_2O、Al(gas)和 Al_2O_3，质量生成率 $\omega_1=-\frac{8}{9}I_{aa}$，$\omega_2=\frac{42}{111}I_a$，$\omega_3=\frac{42}{111}I_a$，$\omega_4=0$，$\omega_5=\frac{27}{111}I_a$，$\omega_6=0$，$T_1\leqslant T_{Al_2O_3}$，$\omega_7=\frac{17}{9}I_{aa}$，气体中考虑可逆反应 $CO+0.5\ O_2\rightleftharpoons CO_2$。$Y$ 为组分浓度，W 为分子量。

对于 RDX 炸药，采用洪滔等[9]提出的模型，计算公式如下：

$$I_a=\begin{cases}0 & T_a<T_m\\ Q_a/L & T_a\geqslant T_m\end{cases} \tag{22}$$

式中：T_m 为炸药颗粒的熔点，L 为炸药潜热。炸药颗粒在激波作用下运动，并在热传导作用下升温，当到达炸药颗粒熔点后开始熔化，发生剥离现象，在高温气体环境中瞬时分解，释放能量。

对于铝颗粒，采用以下模型[10]：

$$I_{aa}=-n_{aa}\rho_{aa}4\pi R_{aa}^2\frac{dR}{dt} \tag{23}$$

$$\frac{1}{R}\frac{dR}{dt}=-\frac{1}{k d_0^m/\Psi^{0.9}} \tag{24}$$

式中：n_{aa} 为单位体积内粒子数，R_{aa} 为粒子半径，$R_{aa}=\sqrt[3]{\frac{3\varphi}{4 n_{aa}\pi}}$，$d_0$ 为粒子初始直径，ψ 为气体中氧气

的摩尔份额，$m=1.75$，F 为气体对粒子的压力，

$$F_{ar}=\frac{n\pi R^2 C_a \rho_1 \sqrt{(u_1-u_2)^2+(v_1-v_2)^2}(u_1-u_2)}{2} \tag{25}$$

$$C_a=\begin{cases}\dfrac{24\times\left(1+\dfrac{Re^{\frac{2}{3}}}{6}\right)}{Re} & Re<1\ 000\\ 0.44 & Re\geqslant 1\ 000\end{cases} \tag{26}$$

式中：Re 为雷诺数，Q_a 为气体与粒子间的热传导，

$$Q_a=4n\pi R^2 \lambda_1 Nu(T_1-T_2)/(2R) \tag{27}$$

式中：λ_1 为气体导热系数，Nu 为 Nusselt 数，q 为单位质量的粒子的反应能。

当温度高于金属氧化物沸点 $T_{Al_2O_3}$ 时，金属氧化物会发生分解[11]，生成气态 Al 和 O_2，因此温度将保持在金属氧化物沸点。

2 模拟结果

为了验证程序的正确性，分别对单独炸药颗粒和铝颗粒情况进行了模拟。炸药密度为 750 g/m^3，半径为 20 μm，起爆条件为 $\varphi_1=1$、$\rho_1=3$ kg/m^3、$u_1=1\ 000$ m/s、$T_1=3\ 600$ K。粉尘从左端起爆，边界条件为左端封闭，右端开口。得到爆轰波传播速度约为 1.899 km/s，峰值压力约 4.75 MPa。S. Eidelman 等[12]得到的峰值压力为 4.84 MPa，D. L. Zhang 等[7]在计算中得到的爆轰波传播速度为 1 802 m/s，董贺飞等[13]得到的爆轰波速度为 1 916 m/s，铝粉尘的密度为 304 g/m^3，铝颗粒半径为 1.7 μm，爆轰管直径为 15.2 cm。起爆条件为 $\varphi_1=1$、$\rho_1=3$ kg/m^3、$u_1=1\ 000$ m/s、$T_1=3\ 600$ K。从左端起爆，边界条件为左端闭合，右端开口，上下为固壁。得到的爆轰波参数为 $D=1\ 630$ m/s、$\rho_{CJ}=2.43$ kg/m^3、$u_{CJ}=673$ m/s、$P_{CJ}=2.04$ MPa、$T=3\ 800$ K，峰值压力为 $P=3.31$ MPa，文献[14]中结果为 $D=1\ 630$ m/s、$\rho_{CJ}=2.48$ kg/m^3、$u_{CJ}=681$ m/s、$P_{CJ}=1.91$ MPa、$T=3\ 800$ K，与 A. J. Tulis 等[15]由实验中得到的铝粉尘爆速 1 650 m/s 符合较好。

3 变密度下双粉尘在空气中的爆轰模拟

由于炸药颗粒与铝颗粒混合爆轰问题的复杂性，我们还研究了颗粒定直径下的爆轰波波速及峰值压力随密度的变化关系。炸药密度 565 g/m^3、半径为 10 μm，铝粉尘半径为 3.5 μm，起爆条件为 $\varphi_1=1$、$\rho_1=2.2$ kg/m^3、$u_1=2\ 000$ m/s、$T_1=3\ 200$ K。粉尘从左端起爆，边界条件为左端封闭，右端开口。如图 2～3 所示，通过拟合关系可以看出，在不改变炸药颗粒密度的情况下，爆轰波波速和峰值压力基本随密度呈线性关系。

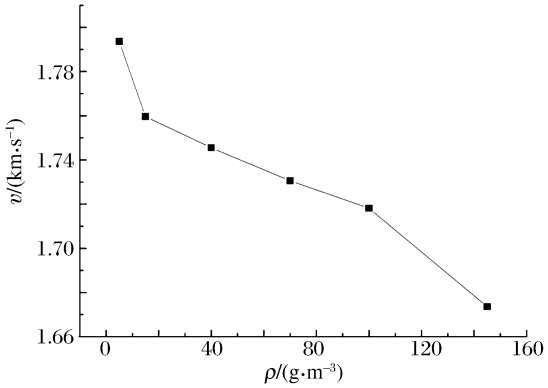

图 2 爆轰波速度随双粉尘中铝粉尘密度的变化

Fig. 2 Wave speed varying with dust density

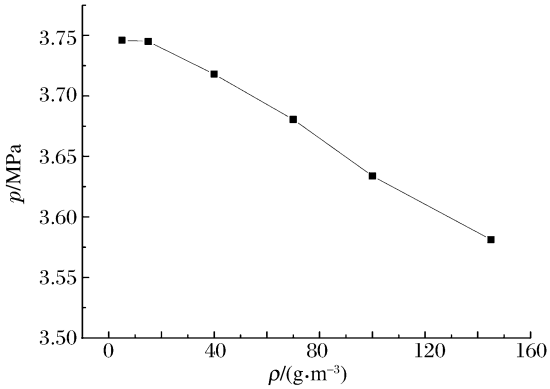

图 3 爆轰波压力随双粉尘中铝粉尘密度的变化

Fig. 3 Detonation pressure varying with dust density

4　复杂通道中的爆轰模型

模拟了在复杂通道中两种粉尘的起爆及爆轰波传播模型，模型如图 4 所示，通道长 3.2 m、宽 1.5 m、障碍物长 0.4 m、宽 0.4 m，分别位于 0.5、1.4 和 2.3 m 处，网格数为 600×240。炸药颗粒密度为 450 g/m^3、半径为 20 μm，铝颗粒密度为 140 g/m^3、半径为 2 μm。从左端起爆，起爆条件为$\varphi_1=1$、$\rho_1=10$ kg/m^3、$u_1=1\ 000$ m/s、$T_1=3\ 000$ K，边界条件为左端封闭、右端为开口，其余为固壁。选取坐标分别为 $A(0.25,0.75)$、$B(1.15,0.75)$、$C(1.15,0.25)$、$D(2.05,0.75)$、$E(2.05,0.25)$、$F(3.0,0.75)$、$G(3.0,0.25)$的 7 个点进行研究。

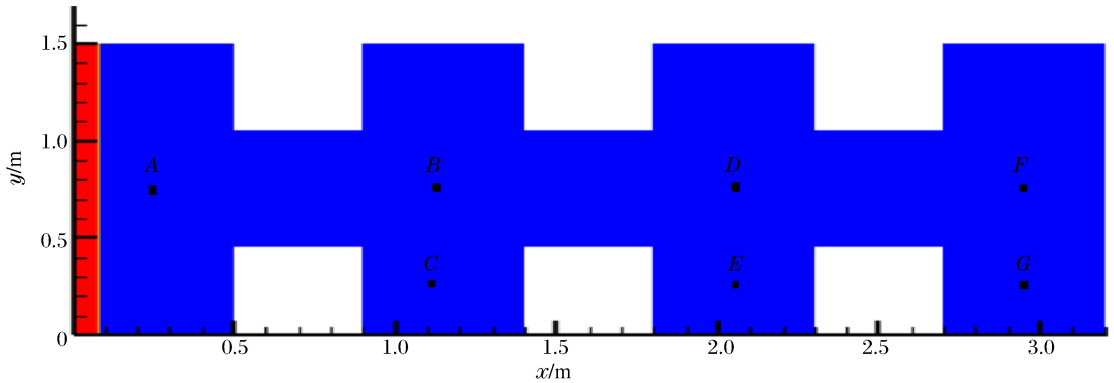

图 4　模拟区域几何模型

Fig. 4　Geometrical model of simulated area

图 5 为爆轰波在复杂通道中传播的压力图，p_1 代表气体流场压力。在 0.318 ms 时，爆轰波到达 0.7 m处，与 0.5 m 处障碍物发生反射，形成反射冲击波，在第 1 个障碍物左固壁处形成高压区域，局部压力达到 7 MPa；0.568 ms 时，爆轰波到达 1.15 m 处，爆轰波从狭窄通道进入宽阔区域发生绕射，在拐角区域形成低压区域，在通道左端可见两道明显的左行反射波，反射波经过 0.5 m 处拐点形成向右绕射波，并与爆轰波形成叠加，在爆轰波最右端可见明显高压区域；0.871 ms 时爆轰波进入第 2 段狭窄通道，与第 2 障碍物左固壁形成的反射波与初始冲击波叠加形成 4 个高压奇点，并在通道左端可见反射形成第 2 道右传冲击波；1.178 ms 时，爆轰波最右端形成高压区域，由于爆轰波绕射拐角处出现低压区域，而第 2 段宽阔通道内由于各种反射波的相互作用，流场变得复杂，形成了 2 个高压区域；1.648 ms 时在第 3 段宽阔通道内形成了类似 0.871 ms 时第 2 段宽阔通道内的高压区域，而此时第 2 段宽阔通道内的 2 个高压区向上运动叠加形成了蘑菇状的高压区域。

图 6 中从左至右依次为点 $A(0.25,0.75)$、$B(1.15,0.75)$、$D(2.05,0.75)$、$F(3.0,0.75)$处的压力值随时间变化曲线。在爆轰波向右传播过程中逐渐趋于稳定，可以看出当爆轰波到达 D 点时，已经变成稳定爆轰，此时爆轰波压力 3.44 MPa，爆轰波传播速度为 1 656.78 m/s。从 C、$D2$ 点的压力值曲线图中可以见到明显的 2 个峰值，第 1 个峰值为初始爆轰波形成，第 2 个峰值为爆轰波在与壁面作用形成的反射波。

图 7 中曲线从左到右依次为 $A(0.25,0.75)$、$B(1.15,0.75)$、$D(2.05,0.75)$、$F(3.0,0.75)$点处的温度随时间变化曲线。从 B、D、F 这 3 点的温度曲线可以看出，当爆轰波到达时，温度迅速提升到 3 400 K左右，而后温度经过缓慢下降，在反射波到达后温度会再次小幅度升高，流场温度始终保持在 3 000 K以上。

对比模拟了铝颗粒单颗粒悬浮粉尘在同种情况下的爆轰过程，图 8 中曲线从左到右依次为 $A(0.25,0.75)$、$B(1.15,0.75)$、$D(2.05,0.75)$、$F(3.0,0.75)$点处的压力随时间变化曲线。对比图 6 可以看出，到达稳定爆轰的距离也变长，流场压力峰值比双颗粒情况低约 1 MPa，模拟得到的爆轰波传播速度约为 1 468.25 m/s，远小于双颗粒情况。对比图 6 与图 8，在 F 点处都为稳定爆轰状态，而双粉尘

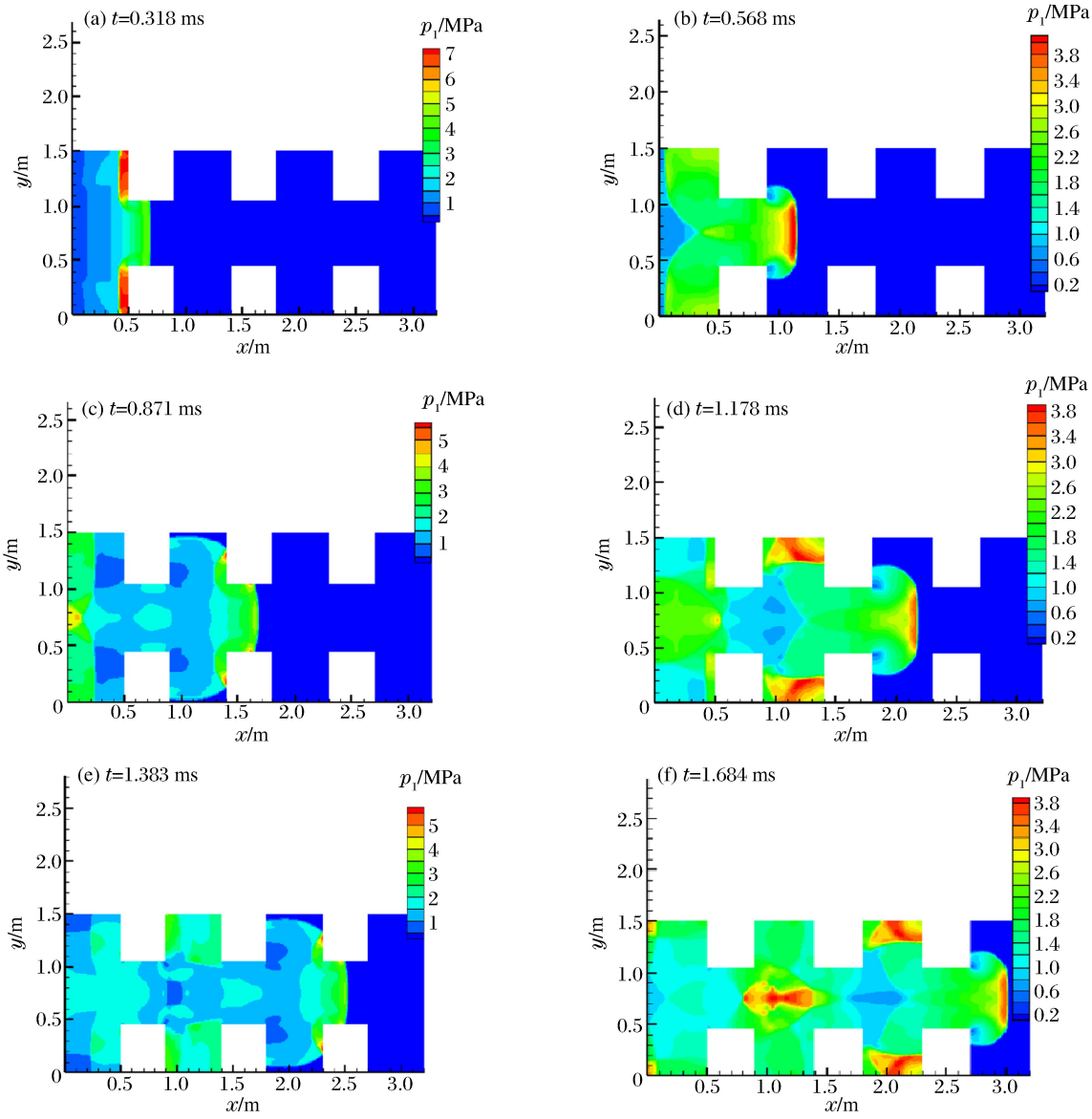

图 5 不同时刻流场压力演化图

Fig. 5 Detonation pressure varying with time

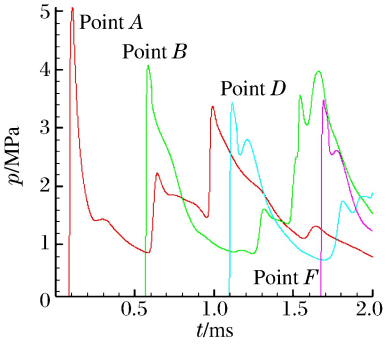

图 6 不同点的压力随时间变化曲线

Fig. 6 Pressure varying with time at different points

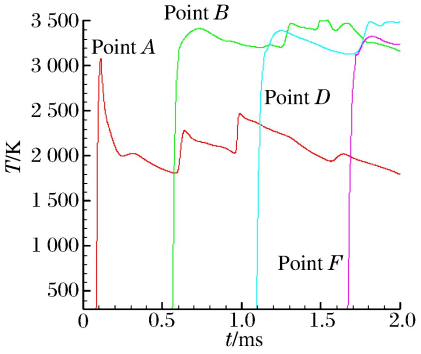

图 7 不同点的温度随时间变化曲线

Fig. 7 Temperature varying with time at different point

爆轰时爆轰波经过 F 点处，压力下降非常明显，说明此时爆轰波宽度较窄，而单颗粒情况下压力下降比双粉尘时明显变缓，说明此时爆轰波的反应区明显加大。图 9 中曲线从左到右依次为 $A(0.25,0.75)$、$B(1.15,0.75)$、$D(2.05,0.75)$、$F(3.0,0.75)$点处的温度随时间变化曲线。流场温度变化规律与双颗粒情况基本相同，但是流场温度明显低于双颗粒情况，并且流场温度变化范围高于双颗粒情况。

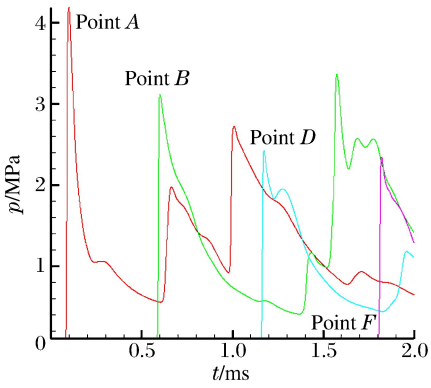

图 8 铝单颗粒时不同点的压力随时间变化曲线

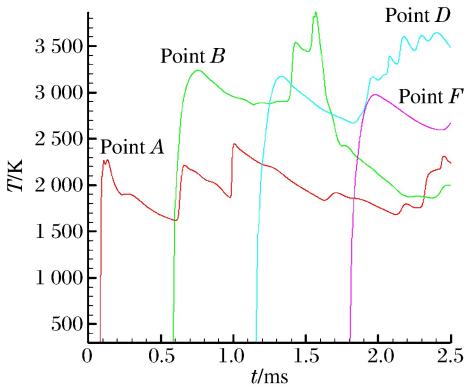

图 9 铝单颗粒时不同点的温度随时间变化曲线

Fig. 8 Pressure varying with time at different points of AlFig. 9 Temperature varying with time at different points of Al

5 结　论

用 CE/SE 方法模拟了空气中悬浮炸药-铝粉尘的二维爆轰模型，通过对比文献验证了模型程序的正确性。研究了双粉尘爆轰过程中颗粒密度对爆轰波速度、爆轰波压力的影响，得到了关于颗粒密度与波速压力的线性关系。模拟了炸药颗粒密度为 450 g/m^3、半径为 20 μm，铝颗粒密度为 140 g/m^3、半径为 2 μm 的悬浮粉尘在复杂通道中的传播过程及流场演化过程，对比单种铝颗粒在同种情况下的爆轰波过程发现，双颗粒爆轰明显提高了流场的峰值压力、温度及爆轰波传播速度，并且爆轰波后的流场温度要比单颗粒的更稳定。

很好地模拟了双粉尘的两相爆轰过程，为以后研究多粉尘复杂情况下的爆轰奠定了基础。本次模拟研究了微米尺度下颗粒的爆轰过程，在纳米尺度下粉尘放能加快，爆轰过程更复杂，在以后的模拟中还要对纳米尺度下多种粉尘的爆轰过程进行细致的研究。

参考文献：

[1] 惠君明，刘荣海，葛桂兰. 提高 FAE 威力的研究(Ⅰ)——高能量燃料的选择[J]. 南京理工大学学报，1995，19(5)：472-476.
Hui Junming，Liu Yonghai，Ge Guilan. Study on increasing the power of FAE(Ⅰ)—selection of high energy fuels [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology，1995，19(5)：472-476.

[2] 陈朗，张寿齐，赵玉华. 不同铝粉尺寸含铝炸药加速金属能力的研究[J]. 爆炸与冲击，1999，19(3)：l-7.
Chen Lang，Zhang Shouqi，Zhao Yuhua. Study of the metal acceleration capacities of aluminized explosives with spherical aluminum particles of different diameter[J]. Explosion and Shock Waves，1999，19(3)：l-7.

[3] 洪滔，秦承森，林文洲. 悬浮 RDX 炸药和铝颗粒混合粉尘爆轰的数值模拟[J]. 爆炸与冲击，2009，29(5)：468-473.
Hong Tao，Qin Chengsen，Lin Wenzhou. Numerical simulation of detonation in suspended mixed RDX and aluminum dust[J]. Explosion and Shock Waves，2009，29(5)：468-473.

[4] Chang S C. The method of space-time conservation element and solution element—A new approach for solving the Navier-Stokes and Euler equations[J]. Journal of Computational Physics，1995，119(2)：295-324.

[5] Wu Y，Yang V，Chang S C. Space-time method for chemically reacting flows with detailed kinetics[M]. Heidelberg：Springer Berlin Heidelberg，2001：207-212.

[6] Dong Hefei，Hong Tao，Zhang Deliang. Application of the CE/SE method to a two-phase detonation model in po-

rousmedia[J]. Chinese Physics Letters, 2011,28(3):30203-30206.

[7] Zhang D L, Wang J T, Wang G. High-order CE/SE method and applications[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2009,26(2):211-220.

[8] Wang J T, Zhang D L, Liu K X. A Eulerian approach based on CE/SE method for 2D multimaterial elastic-plastic flows[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2007,24(4):395-401.

[9] 洪滔,林文洲.激波管中悬浮炸药粉尘爆轰的数值模拟[J].高压物理学报,2010,24(1):15-20.
Hong Tao, Lin Wenzhou, Qin Chengsen. Numerical simulation of suspended RDX dust detonation in a shock tube [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010,24(1):15-20.

[10] Price E W. Combustion of metalized propellants[C]// Progress in Astronautics and Aeronautics: Fundamenals of Solid-Propellant Combustion, AIAA. New York, 1984,90:479-513.

[11] Steinberg T A, Wilson D B, Benz F. The combustion phase of burning particle[J]. Combustion and Flame, 1992, 91(2):200-208.

[12] Eidelman S, Yang X L. Detonation wave propagation in combustible particle/air mixture with variable particle density distributions[J]. Combustion Science and Technology, 1993,89:201-218.

[13] 董贺飞,洪滔,张晓立.CE/SE 方法数值模拟炸药粉尘爆轰[J].中国计算物理通讯,2012,29(4):495-502.
Dong Hefei, Hong Tao, Zhang Xiaoli. Numerical simulation of explosive dust detonation with CE/SE method[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2012,29(4):495-502.

[14] 洪滔,秦承森.悬浮铝粉尘爆轰波参数[J].含能材料,2004,12(3):129-133.
Hong Tao, Qin Chengsen. Parameters of detonation in suspended aluminum dust[J]. Energetic Materials, 2004, 12(3):129-133.

[15] Tulis A J, Selman J R. Detonation tube studies of aluminum particles dispersed in air[J]. Symposium on Combustion, 1982,19(1):655-663.

Numerical simulation of two-phase detonation of suspending RDX-Al dust in air with CE/SE

Zan Wentao[1,2], Hong Tao[2], Dong Hefei[2]

(1. *BeiJing Institute of Technology*, *Beijing* 100088, *China*;
2. *Institute of Applied Physics and Computational Mathematics*, *Beijing* 100088, *China*)

Abstract: In the present work we studied the detonation of Al-RDX suspended in air using CE/SE. The two-phase detonation process of two dusts with different density were simulated and the effects of different particle density on the detonation wave speed and pressure were investigated. It was found that there is a linear relationship between the density ratio and the wave speed and pressure. The flow field evolution of the two dusts detonation in a complex channel was discussed. Compared with the single dust detonation, the detonation wave speed, pressure, and temperature of the two dusts detonation were obviously higher. It is shown that CE/SE is an ideal method at present to simulate the two dusts detonation and can provide useful reference for multi-dust detonation study.

Key words: mechanics of explosion; dust detonation; CE/SE; RDX-Al dust

(责任编辑 曾月蓉)