**文章编号**:1000-5773(2013)03-0343-09

# 基于 MVPPM 的流固耦合方法在爆炸容器数值计算中的应用*

柏劲松,刘　坤,张红平,李　蕾,李　平

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室,四川绵阳　621900)

**摘要**:爆炸容器内部流场演化和壳体结构动力响应可为容器外形、结构和材料选取等设计提供直接的数据支持,但由于爆炸容器具有大尺度、多组分、高密度比和复杂结构等特点,其内部流场数值预测一直以来都比较困难。基于 Level Set 方法,将具有大变形特点的内部气体流场和相对变形较小的容器结构分离开来,对气体流场和容器结构分别采用 Euler 型的 MVPPM方法和 Lagrange 方法进行处理,引入虚拟流体技术处理交界面上的物理信息,成功将这种流固耦合数值方法应用于椭球封头和类球形爆炸容器的数值计算。

**关键词**:爆炸容器;流固耦合数值方法;椭球封头爆炸容器;类球形爆炸容器

**中图分类号**:O357　　**文献标识码**:A

## 1　引　言

爆炸容器具有便于运输和移动、约束爆炸能量和污染、保护试验人员和设备、方便观测与测试等优点,在许多领域得到了广泛应用。对爆炸容器中爆轰产物与金属容器壁面的相互作用问题,目前主要的计算手段是采用 Lagrange 方法[1]。计算时不考虑外部气体作用,主要是因为外部气体密度很小,在同样时间间隔内,其网格变形很大,往往会导致计算不能继续。另外,在 Lagrange 算法中,爆轰产物和飞片接触界面采用滑移面技术处理,这种处理手段较为复杂。为克服这些困难,本研究采用 Euler/Lagrange 的耦合算法[2],即流固耦合算法。流固耦合算法结合了 Euler 和 Lagrange 两种算法的优点,同时克服其各自的缺点,在界面位置精度和流动大变形方面都能满足计算要求,利用虚拟流体方法(Ghost-Fluid Method,GFM)处理不同材料在界面处的相互作用,避免了滑移接触问题。另一个明显的优点是程序编制容易实现,可以直接利用现有的 Euler 和 Lagrange 程序进行耦合。在已有的研究基础上[7],实现自行研制的 MVPPM(Multi-Viscous-Fluid Piecewise Parabolic Method)多介质粘性流体欧拉程序与 DEFEL 拉格朗日程序的耦合,并成功应用于爆炸容器问题的数值模拟,给出了容器内部气体流场的演化和容器壳体的结构响应,计算结果与实验基本一致。

## 2　数值方法

基于 Level Set 的流固耦合方法(GEL,Ghost Eulerian-Lagrangian Method)用于爆炸容器的数值计算时,首先需要对计算域进行划分处理。此时气体/爆轰产物流场采用 Euler 方法进行分析,而固体爆炸容器壳层区域采用 Lagrange 方法进行分析。每个时间步在界面处交换各自信息,对气体来说要确

* **收稿日期**:2011-07-20;**修回日期**:2011-11-07

**基金项目**:国家自然科学基金(11072228);中国工程物理研究院科学技术发展基金(2011B0202005,2011B0201003)

**作者简介**:柏劲松(1968－),男,博士,研究员,主要从事计算流体力学、计算爆炸力学等理论和数值模拟研究.
E-mail:bjsong_mail@21cn.com

定界面或自由面的受力情况，而对固体来说则要求确定界面的位置和速度情况，即 Euler 计算步在界面处为 Lagrange 计算提供压力边界条件，而 Lagrange 计算步在界面处为 Euler 计算提供速度边界条件。换言之，填充不同区域的不同材料在界面处的相互作用，是通过 Euler 和 Lagrange 计算步互相为对方提供一定边界条件来实现的。实际计算中，一般 Lagrange 域包含在 Euler 域中，或者说界面在 Euler 域内部运动(图 1)。

在计算中，Euler 网格有一部分是被 Lagrange 域覆盖的，计算时，需要对这部分网格填充 Ghost 流体。即在 $t$ 时刻，界面将 Euler 域划分为真实流体域与虚拟流体域(Ghost 域)，二者可通过 Level Set 函数 $\varphi$ 加以区别(图 2)。由 $t$ 时刻 Euler 真实流体域的密度、压力、速度等，以及 Lagrange 固体区域的位置、速度、应力和应变等信息计算得到 $t+1$ 时刻的这些流场信息和固体信息，需要采用外插技术(Ghost Fluid 方法)、Euler 域求解以及 Lagrange 域求解共 3 个阶段的计算。下面分别介绍。

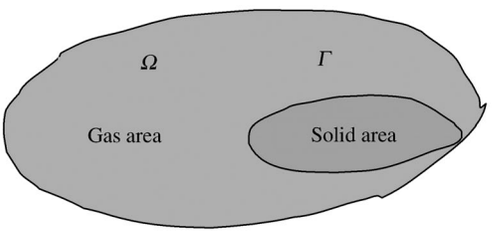



图 1 流固耦合方法中界面位置及计算域示意图

Fig. 1 Schematic configuration of the interface location and computational domain in fluid-solid coupling method

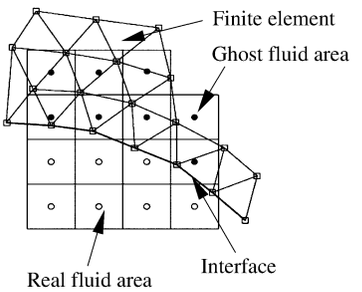



图 2 流固耦合计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the coupled fluid-solid

## 2.1 虚拟流体方法

虚拟流体(Ghost Fluid)域中填充的物理量(见图 3)可通过两种外插方法得到：常数外插和反射外插。其中常数外插方法中 Ghost 流体的物理量可通过如下关系确定

$$\begin{cases}\rho_{\mathrm{G}} = \rho_{\mathrm{E}} \\ \boldsymbol{u}_{\mathrm{G}} = (\boldsymbol{u}_{\mathrm{fs}} \cdot \boldsymbol{n})\boldsymbol{n} + \boldsymbol{u}_{\mathrm{E}} - (\boldsymbol{u}_{\mathrm{E}} \cdot \boldsymbol{n})\boldsymbol{n} \\ p_{\mathrm{G}} = p_{\mathrm{E}}\end{cases} \tag{1}$$

反射外插方法[2]中 Ghost 流体的物理量可通过如下关系确定

$$\begin{cases}\rho_{\mathrm{G}} = \rho_{\mathrm{E}} \\ \boldsymbol{u}_{\mathrm{G}} = (2\boldsymbol{u}_{\mathrm{fs}} \cdot \boldsymbol{n} - \boldsymbol{u}_{\mathrm{E}} \cdot \boldsymbol{n})\boldsymbol{n} + (\boldsymbol{u}_{\mathrm{E}} \cdot \boldsymbol{t})\boldsymbol{t} \\ p_{\mathrm{G}} = p_{\mathrm{E}}\end{cases} \tag{2}$$

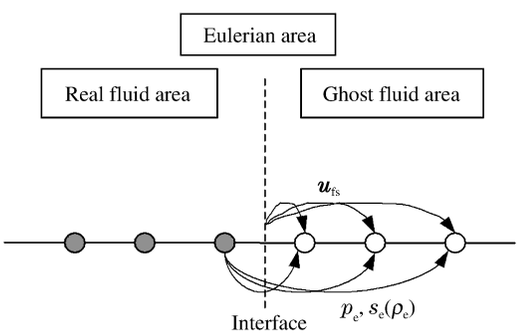



图 3 外插技术中虚拟流体域的填充方法

Fig. 3 Extrapolation techniques of the ghost fluid domain

式中：$\rho$ 为密度，$\boldsymbol{u}$ 为速度矢量，$\boldsymbol{n}$、$\boldsymbol{t}$ 分别为 Ghost 点 Level Set 函数 $\varphi$ 等值线单位梯度方向和切向的矢量，下标“G”表示变量为 Ghost 点值，下标“E”表示变量根据程方程(Eikonal Equation)推进得到的值，程方程为

$$I_t \pm \boldsymbol{n} \cdot \nabla I = 0 \tag{3}$$

式中：$I$ 为外插变量，可以是压力、密度、速度等物理量。这是一个伪时间推进过程，计算时其时间步长和循环次数均可人为选取。

## 2.2 界面速度的计算

从方程(2)、方程(3)可以看出,Ghost 域和真实流体域密度、压力和切向速度分量均是由程方程从真实流体域外推得到的,但法向速度的求解略有差别。Ghost 点的法向速度取决于 Lagrange 网格在界面上投影点的速度 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{fs}}$ 以及外推速度 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{e}}$。对二维情况,Ghost 点与其投影点坐标满足

$$\boldsymbol{x}_{\mathrm{fs}} = \boldsymbol{x}_{\mathrm{G}} - \varphi \boldsymbol{n} \tag{4}$$

这里取负号是因为 Level Set 函数 $\varphi$ 在 Ghost 点取正。假设 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{fs}}(=(x_{\mathrm{fs}}(t), y_{\mathrm{fs}}(t)))$ 落在界面以 $i$ 和 $i+1$ 结点为端点的线段上,与两端点的距离分别为 $d_i$ 和 $d_{i+1}$,两端点的速度为 $\boldsymbol{u}_i$ 和 $\boldsymbol{u}_{i+1}$,则根据线性插值可得到 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{fs}}$

$$\boldsymbol{u}_{\mathrm{fs}} = \frac{d_{i+1}\boldsymbol{u}_i + d_i \boldsymbol{u}_{i+1}}{d_i + d_{i+1}} \tag{5}$$

通过在每个计算时间步更新已知界面的速度和位置,可由上述方法得到气体的变化情况。

## 2.3 Level Set 函数的计算

流场中任意一点 $\boldsymbol{x}$ 的 Level Set 函数的大小为该点与界面/自由面的最短距离,符号假定该点在真实域一侧为负,即 $\varphi(\boldsymbol{x},t)<0$ 对应真实流体,$\varphi(\boldsymbol{x},t)>0$ 对应 Ghost 流体。其中界面的位置和其它信息由 Lagrange 计算域计算得到。Level Set 函数数值的大小表示为

$$\varphi(\boldsymbol{x},t) = \begin{cases} -d(\boldsymbol{x},\Gamma(t)) & \boldsymbol{x} \in \Omega_R \\ 0 & \boldsymbol{x} \in \Gamma(t) \\ d(\boldsymbol{x},\Gamma(t)) & \boldsymbol{x} \in \Omega_G \end{cases} \tag{6}$$

Level Set 函数符号的确定,依赖于界面上点 $\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_2, \cdots, \boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_{i+1}, \cdots$ 对该点所围成的角

$$\varphi(\boldsymbol{x},t) \begin{cases} <0 & \left|\sum_i \alpha(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{x}_{i+1})\right| = 0 \\ =0 & \left|\sum_i \alpha(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{x}_{i+1})\right| = \pi \\ >0 & \left|\sum_i \alpha(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{x}_{i+1})\right| = 2\pi \end{cases} \tag{7}$$

## 2.4 Euler 域计算

在 Euler 域流体的计算中,采用考虑热传导和粘性情况下的 NS 基本方程,以张量形式描述的多介质流场的控制方程组可以写成如方程组(8)的形式,其中 $i$、$j$ 分别代表 $x$、$y$、$z$ 3 个坐标方向,在张量运算中相同的 $i$、$j$ 表示求和。$\rho$、$u$、$p$ 分别为密度、速度、压强,$E$ 表示单位质量的总能量,$N$ 表示介质的种类,$Y^{(s)}$ 表示第 $s$ 种介质的体积分数,各介质的体积分数满足 $\sum Y^{(s)}=1$。

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho}{\partial t} + \dfrac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \\ \dfrac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \dfrac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} + \dfrac{\partial p}{\partial x_i} = \dfrac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \\ \dfrac{\partial \rho E}{\partial t} + \dfrac{\partial (\rho u_j E + p u_j)}{\partial x_j} = -\dfrac{\partial q_j}{\partial x_j} + \dfrac{\partial u_i \sigma_{ij}}{\partial x_j} \\ \dfrac{\partial Y^{(s)}}{\partial t} + \tilde{u}_j \dfrac{\partial Y^{(s)}}{\partial x_j} = \dfrac{\partial}{\partial x_j}\left(D \dfrac{\partial Y^{(s)}}{\partial x_j}\right) \qquad s = 1,2,\cdots,N-1 \end{cases} \tag{8}$$

式中:$\sigma_{ij}$ 为牛顿流体粘性应力张量,$\sigma_{ij} = \mu_{\mathrm{l}}(\partial u_i/\partial x_j + \partial u_j/\partial x_i - (2/3)\delta_{ij}(\partial u_k/\partial x_k))$,$\mu_{\mathrm{l}}$ 为流体的动力粘性系数;$q_j$ 为热传导在单位时间单位空间的能量流,$q_j = -\lambda_{\mathrm{l}} \partial T/\partial x_j$,$T$ 为流体的温度,$\lambda_{\mathrm{l}}$ 为流体的有效导热系数,$\lambda_{\mathrm{l}} = \mu_{\mathrm{l}} c_p / p_{\mathrm{r,l}}$,$c_p$ 为流体定压比热,$p_{\mathrm{r,l}}$ 为流体的普朗特数;$D$ 表示流体的扩散系数。

采用算子分裂技术,将方程组(8)描述的物理过程分解为 3 个子过程进行计算,即整个流量的计算分解为无粘流量、粘性流量和热流量 3 部分。那么方程组(10)可以分裂为如下 2 个方程组

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\rho}{\partial t}+\dfrac{\partial\rho u_j}{\partial x_j}=0\\ \dfrac{\partial\rho u_i}{\partial t}+\dfrac{\partial\rho u_j u_i}{\partial x_j}+\dfrac{\partial p}{\partial x_i}=0\\ \dfrac{\partial\rho E}{\partial t}+\dfrac{\partial(\rho u_j E+pu_j)}{\partial x_j}=0\\ \dfrac{\partial Y^{(s)}}{\partial t}+u_j\dfrac{\partial Y^{(s)}}{\partial x_j}=0 \qquad s=1,2,\cdots,N-1\end{cases} \tag{9}$$

和

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\rho}{\partial t}=0\\ \dfrac{\partial\rho u_i}{\partial t}=\dfrac{\partial\sigma_{ij}}{\partial x_j}\\ \dfrac{\partial\rho E}{\partial t}=-\dfrac{\partial q_j}{\partial x_j}+\dfrac{\partial u_i\sigma_{ij}}{\partial x_j}\\ \dfrac{\partial Y^{(s)}}{\partial t}=\dfrac{\partial}{\partial x_j}\left(D\dfrac{\partial Y^{(s)}}{\partial x_j}\right) \qquad s=1,2,\cdots,N-1\end{cases} \tag{10}$$

对于无粘流量部分，包括对冲击波、稀疏波及接触间断的计算，采用 PPM 方法求解方程组(9)；对于多介质界面，采用 VOF(Volume of Fluid)追踪算法来捕捉，具体推导过程见参考文献[5]。对于粘性流量和热流量的计算，需要在求解方程组(9)的基础上求解方程组(10)。由于牛顿流体粘性应力和能量流仅对流场的动量、能量和界面扩散产生影响，因此方程组(10)中第一个描述的质量保持守恒，离散求解时可以不予考虑，方程组(10)的第 2 个到第 4 个方程采用二阶空间中心差分方法计算，然后再利用两步 Rung-Kutta 方法进行时间推进，求解过程见参考文献[6]。我们研制了具有自主知识产权的多介质粘性流体欧拉计算程序 MVPPM，本研究整个流场均采用 MVPPM 进行计算。

## 2.5 Lagrange 域计算

固体 Lagrange 域的计算采用动力有限元方法进行，其控制方程采用

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t}+\rho\nabla\cdot\boldsymbol{u}=0\\ \rho\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{u}}{\mathrm{d}t}=\nabla\cdot\boldsymbol{\sigma}+\boldsymbol{b}\\ \dfrac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{\sigma}:\nabla\boldsymbol{u}\end{cases} \tag{11}$$

式中：$\sigma_{ij}=-p\delta_{ij}+S_{ij}$，$\rho$、$\boldsymbol{u}$、$\boldsymbol{\sigma}$、$f$、$E$ 分别表示密度、速度矢量、应力张量、外力和内能，$\sigma_{ij}$、$\delta_{ij}$、$S_{ij}$ 分别是应力分量、单位张量分量和偏应力分量。为了使上述方程封闭，还应该补充压力和应变之间的关系，即材料状态方程，对于固体金属材料而言，可选取 Mie-Grüneisen 状态方程等。计算中采用基于流体弹塑性模型的有限元 DEFEL 程序进行计算，具体过程参见文献[4]。

Lagrange 域在边界受到来自 Euler 域真实流体的压力，将这种沿界面连续作用近似为只作用于界面上 Lagrange 节点的集中力。若以界面上的 Lagrange 节点表示其位置和形状，并记 $\Gamma(t)=(\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{x}_2,\cdots,\boldsymbol{x}_n,\boldsymbol{x}_1)$，则对编号为 $i$ 线段，其受到的总力为

$$\boldsymbol{F}_i=\left(\sum_{j=1}^{n}l_j p_j^{\mathrm{C}}\right)\boldsymbol{n} \tag{12}$$

式中：$n$ 为 Euler 网格将 $i$ 线段截成的段数，$l_j$ 为其中第 $j$ 段分线段的长度，$p_j^{\mathrm{C}}$ 为根据 Euler 网格压力插值所得第 $j$ 段中点压力，$\boldsymbol{n}$ 为 $i$ 线段中点指向 Lagrange 域一侧的单位法向矢量。这样 $i$ 线段对其两个端点受力的贡献为

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{L}}=\frac{1}{2}\boldsymbol{F}_i \tag{13}$$

# 3　计算结果与讨论

## 3.1　椭球封头爆炸容器算例

由于爆炸容器具有一定的轴对称性,为了精确地描述球形炸药爆轰波的传播,对 Euler 流场区采用球形坐标计算,壳体 Lagrange 域采用柱坐标进行计算。图 4 所示的椭球封头容器用 45 钢制成,中心起爆为 1 kg TNT 当量并采用瞬时起爆模型,计算域中 Euler 网格数为 230×180。

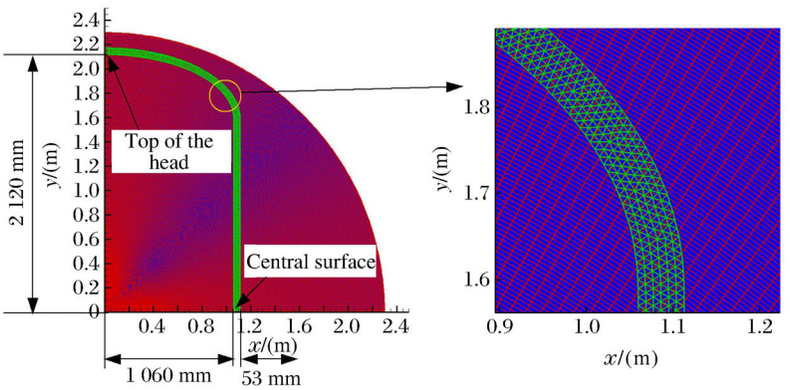



图 4　椭球封头爆炸容器计算域及网格剖分

Fig. 4　Ellipsoidal container head exploded diagram of the computational domain and meshes

图 5 给出了不同时刻的爆炸容器内部的应力波传播情况,可以清楚地看到,爆轰波从球心位置开始向四周传播(0.3 ms),首先遇到中环面,应力波被第一次反射(0.8 ms),该反射波向内传播时,遇到后续的球心爆轰波,又一次被反射,形成二次反射波(1.4～2.0 ms),当应力波传播到封头顶端时,由于汇聚效应再次形成反射波。在整个的流场中,还可清晰地看到马赫杆。

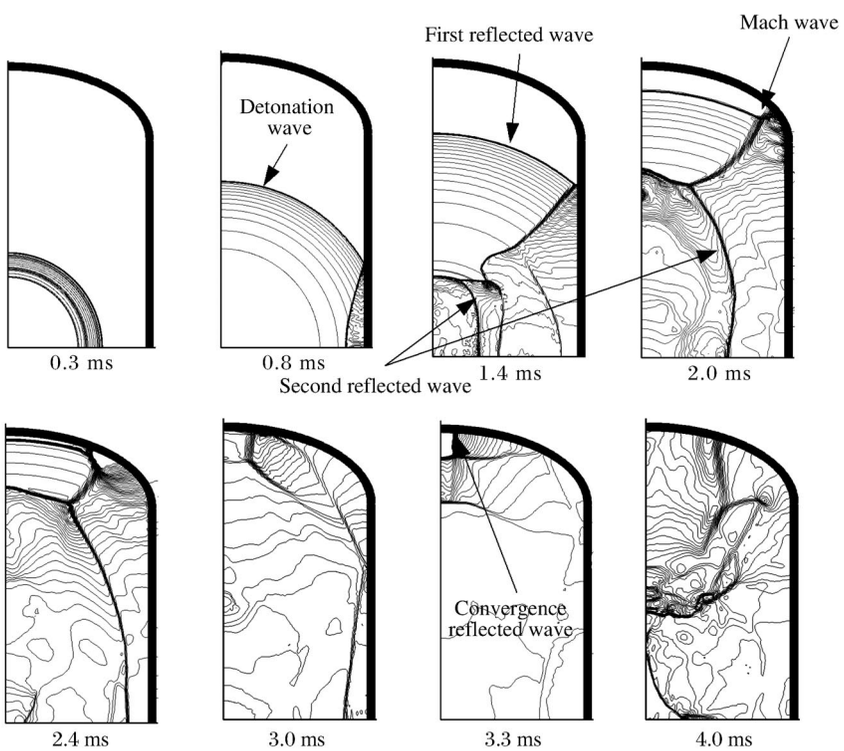



图 5　流场内不同时刻的压力及其相互作用情况

Fig. 5　Pressures of the flow field and its interactions at different times

图 6(a)给出了中环面和封头顶端两个位置处的压力随时间的变化情况。可以看出,由于距离球心炸药近,中环面上很快到达其峰值压力,约 4.5 MPa,随后由于应力波反射稀疏波,压力下降;封头顶端在约 3.4 ms 时刻达到峰值压力 9 MPa,此时正是应力波汇聚开始反射的时刻。图 6(b)则给出了文献中的中环面压力,可以看出,我们的计算结果和文献中的非常接近,间接说明了流固耦合算法的有效性。

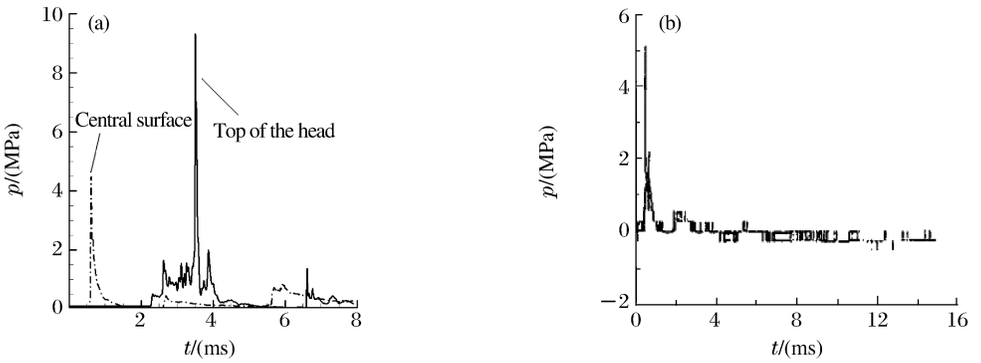



图 6 (a) 计算给出的中环面与封头顶处的压力;(b) 文献中中环面上的压力

Fig. 6 (a) Calculated pressures at the central area and the top of ellipsoidal head model; (b) The pressure given in the literature at the central area

中环面和封头顶端两个位置处的应变随时间的变化在图 7 中给出。可以看出,中环面上应变历史近似于简谐分布,沿 $0.5\times10^{-4}$ 对称上、下振荡,其振荡周期由约 1.5 ms 逐渐减小到 1.3、1.2 ms。封头顶端的应变在 4 ms 附近达到峰值 $2.2\times10^{-3}$,其数值整体比中环面上的应变高一个量级。但由于炸药当量较小,因此爆炸容器的应变也较小,基本没有发生大的变形。

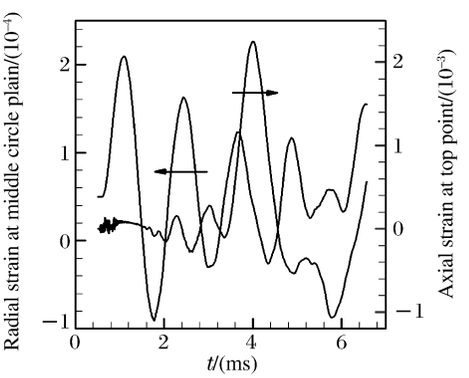



图 7 计算给出中环面与封头顶点的应变

Fig. 7 Calculated strains at the central area and the top of ellipsoidal head model

## 3.2 球形爆炸容器算例

图 8 所示的球形爆炸容器,壳体仍用 45 钢制成,顶部用 LY12 铝材料。容器中心炸药为 25 kg TNT 当量,由于炸药直径远小于容器结构直径,因此忽略炸药起爆过程,运用瞬时起爆模型计算,采用轴对称 1/2 计算域进行网格剖分和计算。为了更全面地分析流场对结构的影响,在壳体内壁不同位置定义 8 个点($A$、$B$、$C$、$D$、$E$、$F$、$G$、$H$),将其数据信息提取出来进行分析。图 9 为球形爆炸容器内几个时刻流场压力等位图,可见其爆轰波传播、绕射、反射、汇聚等复杂波系的相互作用。

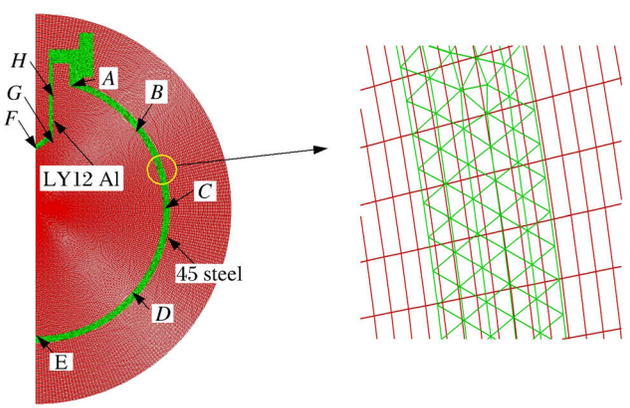



图 8 球形爆炸容器计算域及网格划分示意图

Fig. 8 Spherical explosion vessel diagram of the computational domain and meshes

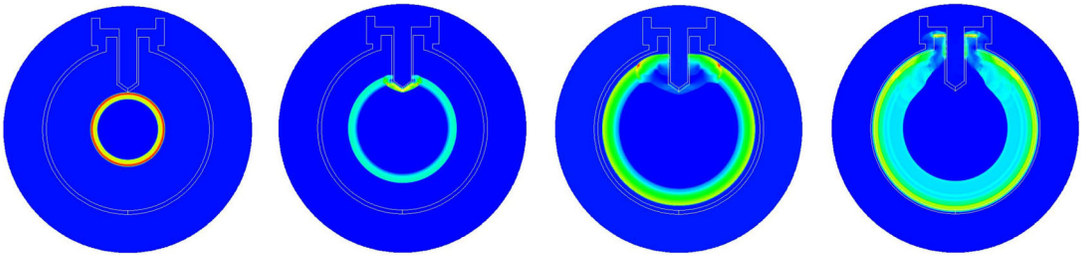



图 9　球形爆炸容器内几个时刻流场压力等位图

Fig. 9　Contour plot of the pressure in the flow field at several times in spherical explosion vessel model

图 10 给出了定义的 8 个位置处压力随时间的演化情况。其中位于壳体内壁上的 $A$、$B$、$C$、$D$、$E$ 5 个点上,其压力到达峰值的时间基本相同,这和他们与球心爆轰点的相同距离有关,而 $A$ 点上的压力峰值较其他 4 个点明显偏低,这与爆轰波传播中受 $F$、$G$ 点绕射、反射影响有关。由 $F$、$G$、$H$ 3 点的压力历史可以看出,其到达压力峰值的时间较 $A$、$B$、$C$、$D$、$E$ 5 点偏早。这由爆轰波的传播即可看出:$F$ 点距球心最近,因而应力波首先到达 $F$ 点,此时 $F$ 点达到其第一个压力峰值;随后受球心到达 $G$ 点的应力波反射的影响,$F$ 点达到其第二个压力峰值,此时正对应 $G$ 点两个压力峰值之间的最低值(球心应力波达到 $G$ 点时对应 $G$ 点的第一个压力峰值,经 $G$ 点反射后,压力值下降到最低值)。

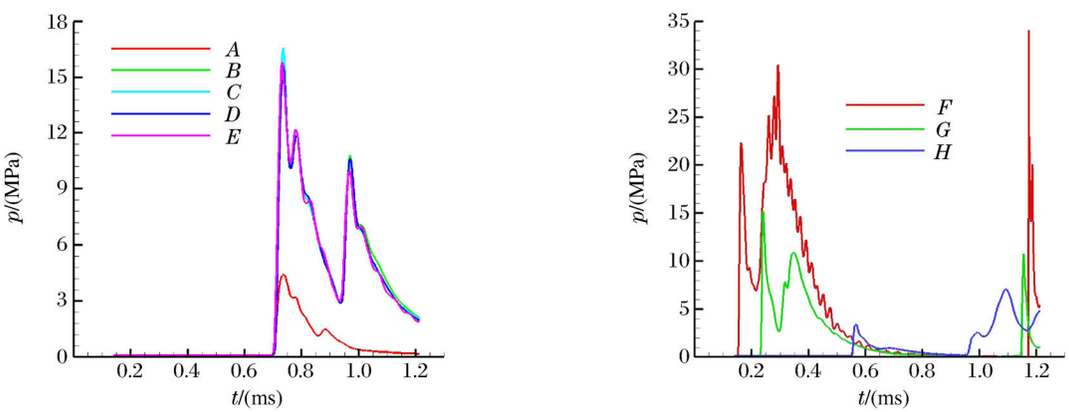



图 10　球形爆炸容器内不同位置点上压力随时间的演化

Fig. 10　Pressure versus time at the different locations within a spherical explosion vessel

图 11 给出了 $C$ 点位置上本研究计算结果和用 DYTRAN 软件计算结果的比较,对于峰值出现时间和峰值大小的判断,两者计算结果的吻合度非常高,充分说明本研究流固耦合算法用于计算爆炸容器问题是合理并有效的。图 12 给出了各位置点的变形情况,在 $A$、$B$、$C$、$D$、$E$ 点的变形中,由于 $A$ 点的峰值压力最小,因此其位移的变化也最小;$F$、$G$、$H$ 点的纵坐标值都经历了压缩波和反射稀疏波的影响,先向外、后向内运动,而在横坐标的位移中,$F$ 点位于对称轴上,横坐标不变,$G$ 点由于应力波的来回反射,其横坐标仅在附近振荡,$H$ 点由于顶部封头和 $A$ 点结构的影响,横坐标振荡后向对称轴方向移动。

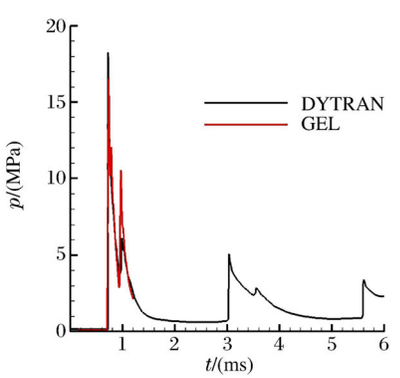



图 11　球形爆炸容器内 $C$ 点计算压力与 DYTRAN 计算结果的比较

Fig. 11　Comparison of calculated pressure trace at $C$ point in spherical explosion vessel model from this work with that from DYTRAN code calculations

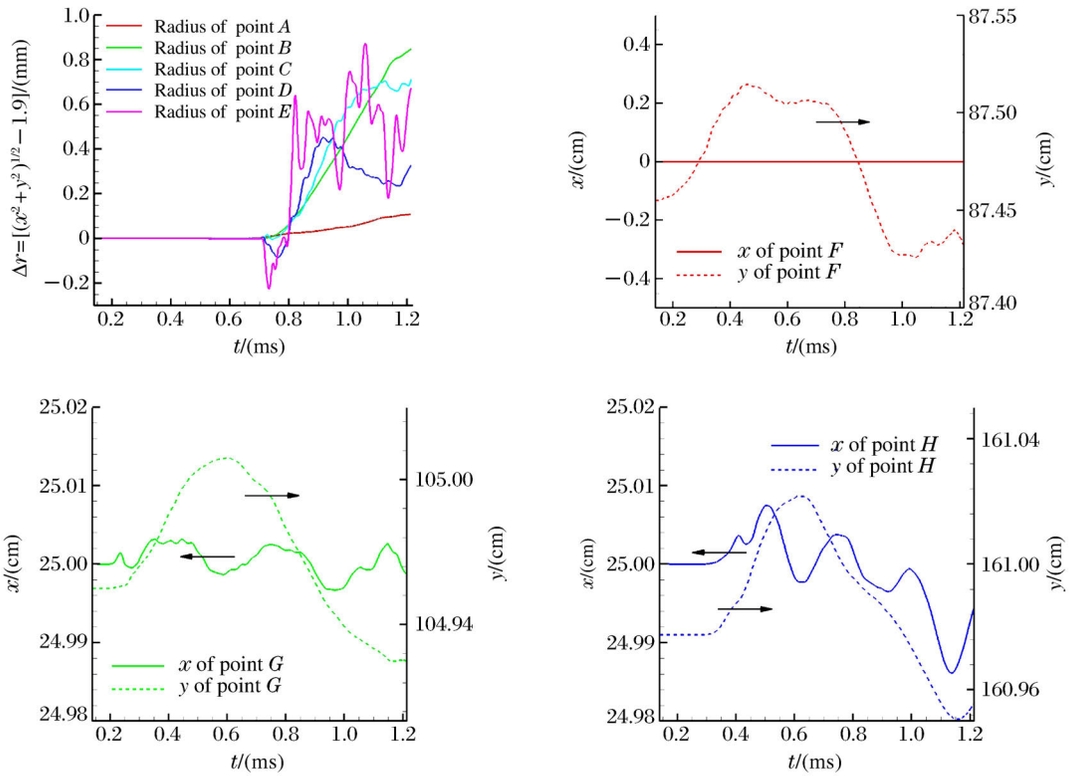



图 12 球形爆炸容器内不同位置点的位移

Fig. 12 Displacement versus time at different locations within a spherical explosion vessel

## 4 结 论

采用流固耦合数值方法成功将自行研制的 MVPPM 多介质粘性流体欧拉程序与 DEFEL 拉格朗日程序耦合，并对椭球封头爆炸容器和球形爆炸容器中点爆轰问题进行了数值模拟，回避了纯Lagrange算法中对滑移接触的处理，得到了容器内部应力波的传播和不同位置点的位移和变形情况，其超压历史与 DYTRAN 程序计算结果符合很好，流场特征符合物理规律，表明该方法和耦合程序能够处理爆轰驱动、多组分、大变形等特点的流固耦合物理问题。

## References:

[1] Jiang Y, Sun C W, Li P, et al. Numerical simulation of the motion of flyer driven by slab explosive initiated at centered point [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(4): 261-265. (in Chinese)
姜 洋, 孙承纬, 李 平, 等. 点起爆炸药驱动平板飞片运动的数值模拟研究 [J]. 高压物理学报, 2009, 23(4): 261-265.

[2] Arienti M, Hung P. A level set approach to Eulerian-Lagrangian coupling [J]. J Comput Phys, 2003, 185: 213-251.

[3] Sun C W, Wei Y Z, Zhou Z K. Applied Detonation Physics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. (in Chinese)
孙承纬, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

[4] Yun S R, Tu H J. Explosion Calculation Method [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995. (in Chinese)
恽寿榕, 涂侯杰. 爆炸力学计算方法 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.

[5] Bai J S, Li P, Chen S H, et al. Numerical simulation of the instability of the jelly surfaces under the imploding drives [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004, 18(4): 295-301. (in Chinese)
柏劲松, 李 平, 陈森华, 等. 内爆加载下果冻内外界面不稳定性数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2004, 18(4): 295-301.

[6] Bai J S, Li P, Zou L Y, et al. Two-dimensional simulation of the mixing induced by interface instabilities [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008, 40(4): 464-471. (in Chinese)
柏劲松,李　平,邹立勇,等. 界面不稳定性引起混合过程的二维数值计算 [J]. 力学学报, 2008, 40(4): 464-471.

[7] Liu K, Bai J S, Li P. Ghost-fluid Eulerian-Lagrangian method and its application [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(3): 456-460. (in Chinese)
刘　坤,柏劲松,李　平. Ghost-fluid Eulerian-Lagrangian 方法及其应用 [J]. 应用力学学报, 2010, 27(3): 456-460.

# Application of the MVPPM-Based Fluid-Solid Coupling Method to the Explosion Vessel Simulations

BAI Jing-Song, LIU Kun, ZHANG Hong-Ping, LI Lei, LI Ping

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

**Abstract**: The flow field evolvements inside the explosion vessel volume and the dynamic response of the vessel shell are basic data in designing of the vessel shape, structure and material selection. But for some reason of the vessel large scale, multi-component, high-density ratio and complex structure, and thus the numerical simulation of explosion flow field inside the vessel is very difficult. In this study, we ultilized the level set method differentiate the large deformation of the flow field from the small deformation of the vessel, and the Euler MVPPM method and Lagrange were respectively used in numerical calculations. The ghost fluid technology was employed to deal with the fluid and solid at the interface of the physical information. We successfully applied the present method to the ellipsoidal head and the similar spherical explosion vessel simulations.

**Key words**: the explosion vessel; the fluid-solid coupling method; the ellipsoidal head vessel; the similar spherical vessel