

炸药爆轰物质点法三维数值模拟*

王宇新, 李晓杰, 王小红, 闫鸿浩, 孙 明

(大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116024)

摘要: 炸药爆轰以及多点起爆所产生的爆轰波汇聚问题很难应用有限元法进行模拟分析,尤其当网格发生畸变时,导致有限元法计算效率和数值精度严重下降,甚至无法得到正确结果.为此,该文应用显式积分算法的物质点法对炸药两点起爆和按时间序列的多点起爆的爆轰过程进行数值模拟,与炸药爆轰的理论计算结果相吻合.物质点法不但可以有效地避免网格畸变问题,而且为炸药爆轰的数值模拟提供了新的思路.

关键词: 无网格法; 物质点法; 爆轰; 数值模拟

中图分类号: O383 **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2015.02.009

引 言

对于炸药爆轰的三维数值模拟,在最近几十年里各种数值方法被研究并应用.传统的炸药爆轰算法主要包括:有限元法、阵面追踪法、特征线法、有限差分法等,虽然特征线法模拟炸药爆轰图像很清晰,但是在三维爆轰求解中算法却非常复杂,计算机编程很难实现^[1].在 DYNA, AUTODYN 等计算力学商业分析软件中,有限差分和有限元法作为主要的模拟方法,通常应用随动网格的 Lagrange(拉格朗日)法、固定网格的 Euler(欧拉)法、任意 Lagrange 法与 Euler 法相结合,还有应用有限体积法等进行炸药爆轰的数值模拟.刘科种、徐更光等应用 AUTODYN 对水下爆炸问题进行模拟^[2].张振宇等采用 Lagrange 法对高能炸药爆轰进行数值模拟^[3].张波等采用一种改进的 Euler 方法模拟凝聚炸药的爆轰^[4].王春等采用有限体积法对散心柱面胞格爆轰演化做了数值研究^[5].当涉及炸药多点起爆问题时,如何处理多物质分界面、网格纠缠、网格畸变及其网格重新划分等都是比较困难的问题,这也是有限元法和有限差分法很难解决的方面.在近十几年来,为了解决传统数值计算方法所遇到的难题,各种无网格法被相继提出并用于求解一些爆炸冲击问题,应用比较多的是 SPH 法,李磊等采用 SPH 法对聚能装药射流做了三维数值模拟研究^[6].无网格法有十多种,它们共同的特征是将连续体划分为离散的质点,有的无网格法不需要任何网格,有的无网格法则需要布置在背景网格中,在计算过程中也都可以有效地避免网格重新划分问题.这样的特点在计算冲击大变形、炸药爆轰和多相介质耦合分析问题,离散质点之间不会发生互相穿越和缠绕^[7],而且也解决了在应用有限元和有限差

* 收稿日期: 2014-08-03; 修订日期: 2014-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(10972051;11272081)

作者简介: 王宇新(1972—),男,辽宁辽阳人,副教授,博士(E-mail: wyxphd@dlut.edu.cn);

李晓杰(1963—),男,辽宁大连人,教授,博士(通讯作者. E-mail: dymat@163.com).

分法计算爆炸冲击问题时所遇到的难点,数值计算精度和效率都能得以提高。

物质点法(material point method, MPM)也是无网格法之一,它是在质点网格 PIC (particle-in-cell)法和 FLIP (fluid implicit particle)两个计算方法的基础上发展形成的^[8],在模拟炸药爆轰、高速冲击和大变形等问题具有很大优势。在 MPM 中,首先是将连续体划分为离散的质点集合,每个质点都有各自的质量,并且质点按照连续体构形布置在固定的背景网格中,每个物质点与其所处的背景网格节点通过形函数建立映射关系。当施加速度、外部载荷等条件时,连续体发生运动或者变形都是通过这些质点来描述,背景网格在全部计算过程中保持固定不变。除了作为定义计算区域的用途外,还是实现与质点两次映射计算的中间载体。MPM 结合了 Lagrange 法和 Euler 法的优势,与其它无网格法相比,计算效率比较高,尤其在模拟炸药爆轰以及多点起爆所产生的爆轰波汇聚等问题时表现了突出的优点^[9]。本文除了叙述 MPM 的基本数值算法外,还对炸药两点起爆和多点起爆的爆轰过程进行三维数值模拟。通过三维数值模拟结果也验证了 MPM 在模拟炸药爆轰问题中的有效性和准确性。

1 MPM 的基本理论

MPM 计算各种力学问题时,连续体被划分为离散质点并布置在背景网格中,每个质点都有各自的集中质量,质量大小与质点所占据的空间和材料密度有关。在计算过程中,离散的质点与背景网格节点之间要应用形函数进行两次映射计算实现连续体运动信息的更新。在这个过程中,必须采用连续体的本构模型、质量守恒和动量守恒方程才能计算背景网格中质点的应变、应力数值^[10]。由于 MPM 的背景网格与有限元网格的作用是不同的,背景网格作为计算域和映射计算的载体是固定不变的。与其它数值方法相同,MPM 在计算时满足连续方程:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

和运动方程

$$\rho \mathbf{a} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b}, \quad (2)$$

其中 $d\rho/dt$ 为物质时间导数, ρ 为材料密度, \mathbf{a} 是加速度, \mathbf{v} 是质点速度, \mathbf{b} 是单位体积力, $\boldsymbol{\sigma}$ 是 Cauchy (柯西) 应力张量。当把连续体划分为 N_p 个质点以后,连续体的变形和运动都是通过这些质点来描述的。假定质点 p ($p = 1, 2, \dots, N_p$) 在时刻 t 的位置是 \mathbf{x}'_p , 密度是 ρ'_p , 质量等于 M_p , 速度是 \mathbf{v}'_p , Cauchy 应力定义为 $\boldsymbol{\sigma}'_p$, 任何时刻所有质点的质量都是不变的,那么连续方程(1)自然就得到满足。接下来定义试函数 \mathbf{w} , 可以得到运动方程(2)的弱形式^[11]:

$$\int_{\Omega} \rho \mathbf{w} \cdot \mathbf{a} d\Omega = - \int_{\Omega} \rho \boldsymbol{\sigma}^s : \nabla \mathbf{w} d\Omega + \int_{\partial\Omega_c} \rho \mathbf{c}^s \cdot \mathbf{w} dS + \int_{\Omega} \rho \mathbf{w} \cdot \mathbf{b} d\Omega, \quad (3)$$

其中 Ω 是连续体当前的构形, $\boldsymbol{\sigma}^s$ 是比应力张量 ($\boldsymbol{\sigma}^s = \boldsymbol{\sigma}/\rho$), $\partial\Omega_c$ 是应力边界, 这个边界上应力等于 \mathbf{c} ($\mathbf{c}^s = \mathbf{c}/\rho$), 由于在位移边界上 \mathbf{w} 定义为 $\mathbf{0}$, 所以对于构成连续体的这些具有集中质量的质点来说, 它们的密度可以变成 δ 函数形式:

$$\rho(\mathbf{x}, t) = \sum_{p=1}^{N_p} M_p \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}'_p). \quad (4)$$

这样式(4)就可以写成如下形式:

$$\begin{aligned} \sum_{p=1}^{N_p} M_p \mathbf{w}(\mathbf{x}'_p, t) \cdot \mathbf{a}(\mathbf{x}'_p, t) = & - \sum_{p=1}^{N_p} M_p \boldsymbol{\sigma}^s(\mathbf{x}'_p, t) : \nabla \mathbf{w}(\mathbf{x}, t) \Big|_{\mathbf{x}'_p} + \\ & \sum_{p=1}^{N_p} M_p \mathbf{w}(\mathbf{x}'_p, t) \cdot \mathbf{c}^s(\mathbf{x}'_p, t) / h + \sum_{p=1}^{N_p} M_p \mathbf{w}(\mathbf{x}'_p, t) \cdot \mathbf{b}(\mathbf{x}'_p, t), \end{aligned} \quad (5)$$

其中 h 是边界层厚度,在背景网格节点上包含多个参数:坐标 \mathbf{x}_i^t ,位移 \mathbf{u}_i^t ,速度 \mathbf{v}_i^t 和加速度 \mathbf{a}_i^t 以及试函数 \mathbf{w}_i^t 等,如果统一采用 $\mathbf{r}_i^t (i = 1, 2, \dots, N_n)$ 来表示,通过形函数进行映射计算以更新质点相应的参数 \mathbf{r}_p^t , 计算公式如下:

$$\mathbf{r}_p^t = \sum_{i=1}^{N_n} \mathbf{r}_i^t N_i(\mathbf{x}_p^t). \quad (6)$$

然后,把从背景网格节点插值计算得到的各参量代入式(5)中,可以得到如下公式:

$$\sum_{i=1}^{N_n} \mathbf{w}_i^t \cdot \sum_{j=1}^{N_n} m_{ij}^t \mathbf{a}_j^t = - \sum_{i=1}^{N_n} \mathbf{w}_i^t \cdot \sum_{p=1}^{N_p} M_p \boldsymbol{\sigma}_p^{s,t} \cdot \nabla N_i(\mathbf{x}) \Big|_{\mathbf{x}_p^t} + \sum_{i=1}^{N_n} \mathbf{w}_i^t \cdot (\mathbf{c}_i^t + \mathbf{b}_i^t), \quad (7)$$

其中

$$m_{ij}^t = \sum_{p=1}^{N_p} M_p N_i(\mathbf{x}_p^t) N_j(\mathbf{x}_p^t), \quad (8)$$

$$\mathbf{c}_i^t = \sum_{p=1}^{N_p} M_p \mathbf{c}_p^{s,t} N_i(\mathbf{x}_p^t) / h, \quad (9)$$

$$\mathbf{b}_i^t = \sum_{p=1}^{N_p} M_p \mathbf{b}(\mathbf{x}_p^t, t) N_i(\mathbf{x}_p^t). \quad (10)$$

因为 MPM 的试函数可以是任意的,则式(7)两侧去掉试函数就成为如下形式:

$$\sum_{j=1}^{N_n} m_{ij}^t \mathbf{a}_j^t = (\mathbf{f}_i^t)^{\text{int}} + (\mathbf{f}_i^t)^{\text{ext}}, \quad i = 1, 2, \dots, N_n. \quad (11)$$

式(11)中内部力的计算等于

$$(\mathbf{f}_i^t)^{\text{int}} = - \sum_{p=1}^{N_p} M_p \boldsymbol{\sigma}_p^{s,t} \cdot \nabla N_i \Big|_{\mathbf{x}_p^t}, \quad (12)$$

外部力的计算等于

$$(\mathbf{f}_i^t)^{\text{ext}} = \mathbf{b}_p^t + \mathbf{c}_p^t. \quad (13)$$

应用行求和形式获得对角质量阵,式(8)和式(10)就变为

$$m_i^t = \sum_{p=1}^{N_p} M_p N_i(\mathbf{x}_p^t), \quad (14)$$

$$\mathbf{b}_i^t = m_i^t \mathbf{b}(\mathbf{x}_p^t, t). \quad (15)$$

从而运动方程(11)化为

$$m_i^t \mathbf{a}_i^t = (\mathbf{f}_i^t)^{\text{int}} + (\mathbf{f}_i^t)^{\text{ext}}, \quad i = 1, 2, \dots, N_n. \quad (16)$$

MPM 计算是采用显式积分算法,离散质点的位移、速度、应力和应变等参数信息的更新必须通过与背景网格节点的两次映射计算完成.第一次映射计算是将质点参数信息映射到背景网格上,然后在背景网格上求解运动方程,即式(16).背景网格节点运动信息被更新后,将网格节点更新的参数再映射回离散的质点上,这样经过两次映射计算就得到了质点下一时刻的构形和应力应变值.在计算过程中背景网格是相同的并且始终固定,这样避免了传统计算方法中网格畸变所带来的负面影响,而且在背景网格中的质点不会发生相互纠缠或穿越现象^[12-15],这也是普通有限元法所不具备的优势.

2 炸药爆轰数值模拟

2.1 炸药爆轰计算模型

为了实现炸药爆轰的三维数值模拟,本文设计了矩形炸药的 2 点同时起爆和 6 点按时间

序列起爆计算模型,具体装药形式如图 1 所示。

炸药采用铵油,宽度为 200 mm,高度为 400 mm,厚度为 20 mm。本文应用自主研制开发的无网格 MPM 的数值计算程序(SPM2.0 前处理软件和 SPS2.0 计算以及后处理软件)对矩形炸药沿着中线两端分别布置 2 个起爆点和 6 个起爆点,2 个起爆点为同时点火模式,6 个起爆点沿着中线从下方至上方按照等间距和固定时间序列起爆,每个起爆点设计在炸药厚度方向的中间位置,点火间隔时间为 $0.5 \mu\text{s}$ 。

2.2 MPM 前处理

基于上述炸药爆轰的计算模型,首先要进行前处理质点划分。本文应用 MPM 前处理软件 SPM2.0 完成该计算模型的前处理。前处理主要涉及背景网格和质点剖分密度问题,通常背景网格剖分密度越大,计算精度越高,但是数值计算效率将下降,对于三维计算尤为明显。那么在每个背景网格单元内质点划分数量一般对于三维计算问题通常定义为 8 个质点,太少则计算精度不够,质点数量也不能太多,假设加密每个背景网格单元内的质点数量,不仅使得计算效率下降,还造成比较严重的数值振荡现象。因此,在本文计算炸药三维爆轰问题时,综合考虑计算精度和计算效率两方面,定义三维背景网格单元长度等于 3,在每个背景网格的立方体单元中定义质点数量为 8 个。2 个起爆点或者按时间序列点火的 6 个起爆点都沿着中线等间距布置,应用 SPM2.0 程序所完成的前处理结果如图 2 所示。

炸药的前处理质点单元数量总计为 31 850 个,炸药选择铵油,其爆轰速度为 2 800 m/s,因为是非标准高爆速炸药,所以爆轰产物状态方程采用下式的形式:

$$p = (\gamma - 1)\rho E. \quad (17)$$

该爆轰状态方程在计算低爆速炸药的爆轰问题时经常采用,能比较准确地计算出爆轰压力,铵油炸药的多方指数 γ 经过爆轰实验测定等于 2.0, p 是爆轰压力, E 是铵油单位比内能,大约等于 $3.8 \times 10^6 \text{ J/kg}$,炸药密度 ρ 等于 $1\,000 \text{ kg/m}^3$ 。

在计算炸药爆轰过程中,为了使炸药的化学反应和燃烧过程持续地传播下去,在 MPM 的数值计算中还要定义炸药的化学反应率方程,并与爆轰状态方程进行耦合计算。一般常用的炸药反应率函数使用 Wilkins 函数,其函数形式如下:

$$F = \begin{cases} 0, & t < t_b, \\ \frac{t - t_b}{\Delta L}, & t_b \leq t \leq t_b + \Delta L, \\ 1, & t > t_b + \Delta L, \end{cases} \quad (18)$$

其中, F 是燃烧函数因子, F 值变化范围在 0~1 之间, t_b 是爆轰波阵面到达未起爆的炸药质点

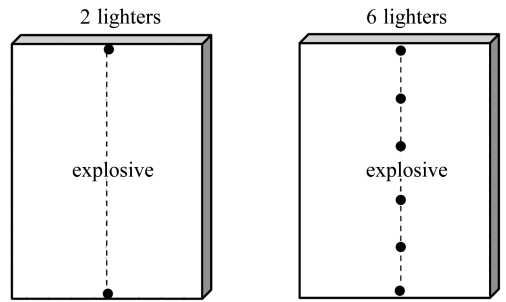


图 1 多点起爆炸药爆轰计算模型

Fig. 1 The computational model for detonation of explosive with multiple lighters

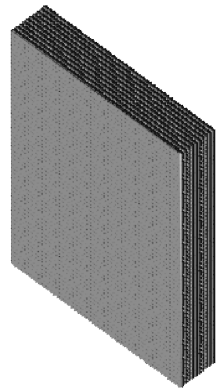


图 2 矩形炸药 MPM 前处理

Fig. 2 Preprocess result of the rectangular explosive

时刻,即炸药质点开始起爆的时间, t 是目前显式积分计算的时间, $\Delta L = r_b A_e / (V_d L_{e \max})$, 式中的 $L_{e \max}$ 和 A_e 是炸药质点所在的背景网格单元的最大边长和面积, V_d 是炸药的爆速, r_b 是控制炸药燃烧过程的可调节参数因子, 其数值一般取 3~6 之间. 燃烧函数描述了炸药爆轰过程的 3 种状态, 分别是炸药的凝固态、爆炸反应过渡区和爆轰气体产物区, 应用燃烧函数可以将未起爆的炸药与爆轰产物状态方程耦合在一起, 这样炸药的爆轰方程形式如下:

$$p = p(\rho, E)F. \quad (19)$$

为了实现炸药质点的起爆燃烧模拟, 在起爆点周围的几个炸药质点的 F 值要定义为 1, 其它炸药质点的 F 值都等于 0. 炸药起爆网格被初始化后, 接下来就可以应用 MPM 对炸药爆轰过程进行模拟.

2.3 爆轰三维数值模拟

在不考虑温度和热传递的绝热条件下, 应用 SPS2.0 程序对 2 点同时起爆的矩形炸药爆轰过程进行三维模拟. 随着两端炸药的点火, 爆轰波不断地相向传播, 爆轰压力稳定在 2.6 GPa 左右, 最后在中间位置汇聚, 导致爆轰压力也骤然升高, 大约为 4 GPa 左右. 当爆轰波继续传播, 直到整体炸药全部燃烧完毕, 最后爆轰压力场达到均匀化. 图 3 为矩形炸药三维爆轰压力场数值模拟结果.

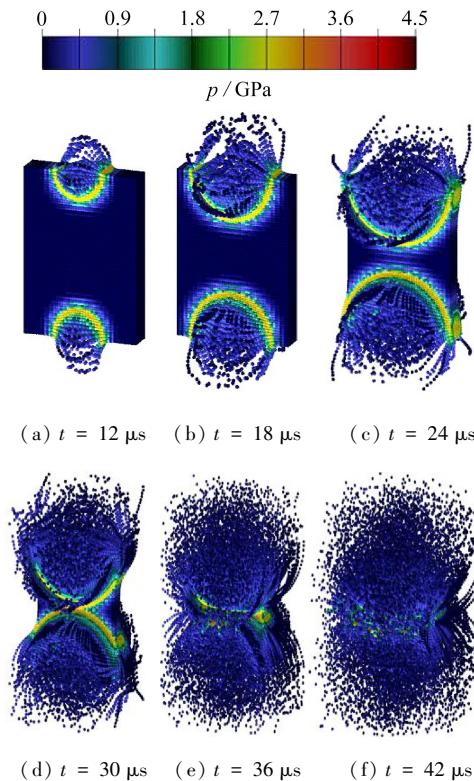


图 3 2 点起爆炸药爆轰三维压力场

Fig. 3 3D detonation pressure in the case of 2 lighters

为了更清楚地观察 2 点起爆的爆轰波传播汇聚过程, 本文给出了矩形炸药中间剖面的爆轰压力场变化过程, 如图 4 所示.

对于按照时间序列 6 点起爆的矩形炸药的三维数值模拟, 需要软件处理炸药起爆点的不同

同点火时间,燃烧函数仍然采用式(18),爆轰波传播过程以及碰撞的爆轰压力场变化情况,如图5所示。

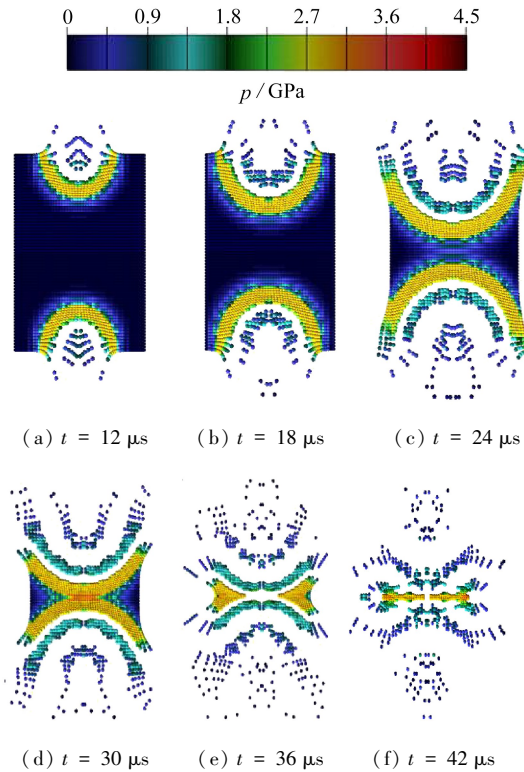


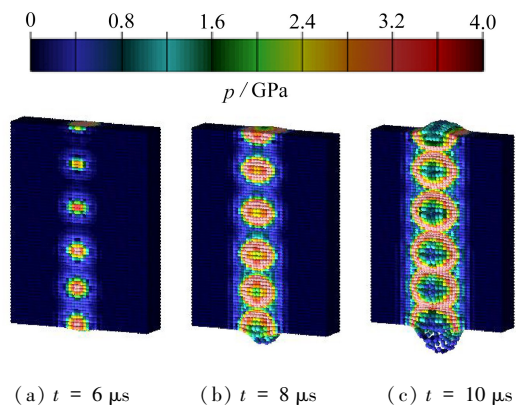
图4 2点起爆炸药爆轰压力场正向剖面图

Fig. 4 Detonation pressure on the forward section in the case of 2 lighters

同样,为了观察矩形炸药6点起爆在中间剖面的爆轰波形成与传播过程,本文给出了不同时刻在中间剖面的爆轰压力场变化,如图6所示。

从上述2点起爆和6点起爆的炸药爆轰数值模拟结果可知:爆轰波阵面前端压力最高,而且衰减特别迅速,爆轰波阵面的压力应该与炸药CJ爆轰压力相近,CJ爆轰压力理论计算公式为^[16]

$$p = \frac{\rho_0 D^2}{1 + \gamma} \quad (20)$$



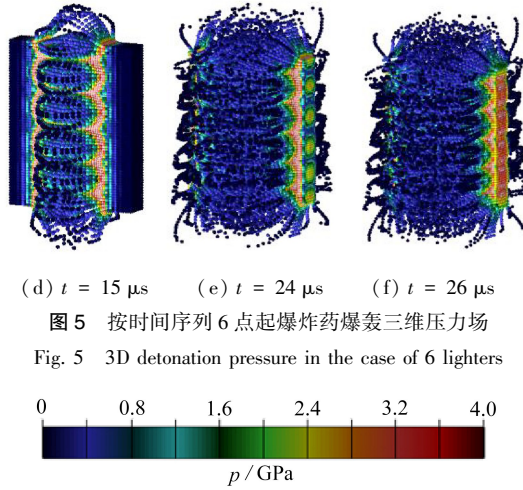


图 5 按时间序列 6 点起爆炸药爆轰三维压力场

Fig. 5 3D detonation pressure in the case of 6 lighters

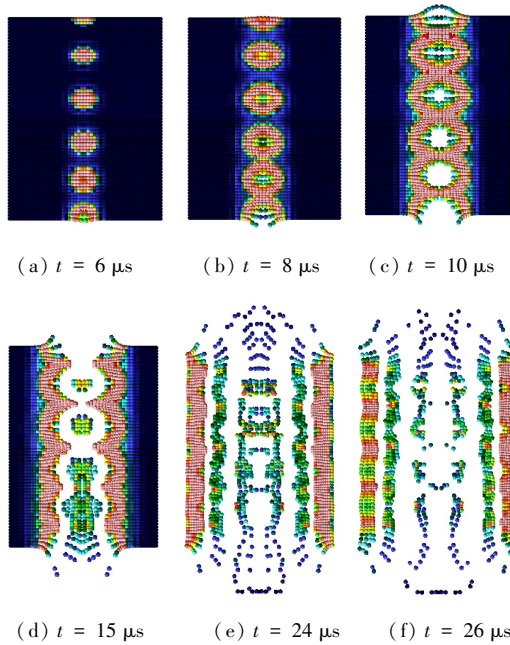


图 6 6 点起爆炸药爆轰压力场正向剖面图

Fig. 6 Detonation pressure on the forward section in the case of 6 lighters

由式(20)计算铵油的爆轰压力 $p = 2.613 \text{ GPa}$, 这与 MPM 数值模拟结果是一致的, 当铵油炸药起爆之后, 爆轰压力始终稳定在 CJ 爆轰压力附近, 以此也说明了这种数值计算方法在计算炸药爆轰问题时具有较高的准确度。

3 结 论

通过本文应用 MPM 对 2 点同时起爆和按时间序列 6 点起爆的炸药爆轰过程三维数值模拟的结果可知:

1) 应用 MPM 在求解炸药爆轰和多点按时间序列起爆的爆炸力学问题方面具有比较大的优势, 与有限差分和有限元等数值方法相比, 避免了网格单元的重新划分, 与 Euler 法相比, MPM 结合了 Euler 法和 Lagrange 法两者的优点, 有效地跟踪了爆轰波传播运动界面和汇聚碰

撞的过程。

2) 由 MPM 三维数值模拟结果可知,按照普通矩形装药形式,如果通过设置不同起爆形式也可以实现爆轰能量积聚作用,为聚能切割工程实际应用提供了一种新的思路。

3) 应用 MPM 三维数值计算获得的爆轰压力与 CJ 爆轰理论计算值相吻合,这也说明了 MPM 在模拟各种炸药爆轰问题时有较高的计算精度。

参考文献(References):

- [1] 李恩征,张风国.二维弹塑性有限元程序全自动重分[J].爆炸与冲击,2001,21(4):241-247. (LI En-zheng, ZHANG Feng-guo. Fully automatic rezoning for elastic-plastic finite-element program in 2D[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2001, 21(4): 241-247. (in Chinese))
- [2] 刘科种,徐更光,辛春亮,杨拯磊,秦建. AUTODYN 水下爆炸数值模拟研究[J]. 爆破,2009,26(3):18-21. (LIU Ke-zhong, XU Geng-guang, XIN Chun-liang, YANG Zheng-lei, QIN Jian. Research on numerical simulation in underwater explosion by AUTODYN[J]. *Blasting*, 2009, 26(3): 18-21. (in Chinese))
- [3] 张振宇,浣石,卢芳云,刘吉平.高能炸药爆轰波反应区流场的拉格朗日分析方法[J].爆炸与冲击,1996,16(3):271-277. (ZHANG Zhen-yu, HUAN Shi, LU Fang-yun, LIU Ji-ping. Lagrangian analysis of flow field in detonation reaction zone of high explosives[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1996, 16(3): 271-277. (in Chinese))
- [4] 张波,于明.用一种改进的 Euler 方法模拟凝聚炸药的爆轰[J].含能材料,2006,14(3):195-199. (ZHANG Bo, YU Ming. Numerical simulation of detonation in condensed explosives by using an improved Eulerian method[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2006, 14(3): 195-199. (in Chinese))
- [5] 王春,姜宗林,胡宗民,韩桂来.散心柱面胞格爆轰演化数值研究[J].应用数学和力学,2008,29(11):1347-1354. (WANG Chun, JIANG Zong-lin, HU Zong-min, HAN Gui-lai. Numerical investigation on the evolution of the cylindrical cellular detonation[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2008, 29(11): 1347-1354. (in Chinese))
- [6] 李磊,沈兆武,李学岭,倪小军. SPH 方法在聚能装药射流三维数值模拟中的应用[J].爆炸与冲击,2012,32(3):316-322. (LI Lei, SHEN Zhao-wu, LI Xue-ling, NI Xiao-jun. Application of SPH method to numerical simulation of shaped charge jet[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(3): 316-322. (in Chinese))
- [7] Belytschko T, Krongauz Y, Organ D, Fleming M, Krysl P. Meshless methods: an overview and recent developments[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1996, 139(1/4): 3-47.
- [8] Sulsky D, Zhou S J, Schreyer H L. Application of a particle-in-cell method to solid mechanics [J]. *Computational Physics Communication*, 1995, 87(1/2): 236-252.
- [9] Hornemann U, Holzwarth A. Shaped charge penetration in alumina targets[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 20(1/5): 375-386.
- [10] Chen Z, Hu W, Shen L, Xin X, Brannon R. An evaluation of the MPM for simulating dynamic failure with damage diffusion[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2002, 69(17): 1873-1890.
- [11] WANG Yu-xin, Beom H G, SUN Ming, LIN Song. Numerical simulation of explosive welding using the material point method[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(1): 51-60.

- [12] 黄鹏, 张雄, 马上, 王汉奎. 基于 OpenMP 的三维显式物质点法并行化研究[J]. 计算力学学报, 2010, **27**(1): 21-27. (HUANG Peng, ZHANG Xiong, MA Shang, WANG Han-kui. Parallelization of 3D explicit material point method using OpenMP[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2010, **27**(1): 21-27. (in Chinese))
- [13] 王宇新, 陈震, 孙明. 滑移爆轰问题无网格 MPM 法数值模拟[J]. 力学与实践, 2007, **29**(3): 20-25. (WANG Yu-xin, CHEN Zhen, SUN Ming. Numerical simulation of slippage detonation by material point method[J]. *Mechanics and Practice*, 2007, **29**(3): 20-25. (in Chinese))
- [14] 王宇新, 陈震, 孙明. 多相介质爆炸冲击响应物质点法数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2008, **28**(2): 154-160. (WANG Yu-xin, CHEN Zhen, SUN Ming. Simulation of explosion and shock involving multiple materials based on the material point method[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, **28**(2): 154-160. (in Chinese))
- [15] Zhang D Z, Zou Q, VanderHeyden B W, Ma X. Material point method applied to multiphase flows[J]. *Journal of Computational Physics*, 2008, **227**(6): 3159-3173.
- [16] 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: 13-17. (SUN Cheng-wei, WEI Yu-zhang, ZHOU Zhi-kui. *Application Explosion Physics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 13-17. (in Chinese))

3D Simulation of Explosive Detonation With the Material Point Method

WANG Yu-xin, LI Xiao-jie, WANG Xiao-hong, YAN Hong-hao, SUN Ming
(*Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology,
Dalian, Liaoning 116024, P.R.China*)

Abstract: It is difficult to simulate the explosive detonation of multi-lighter points and describe the assembling energy of detonation waves with the existent finite element methods. Particularly, computational efficiency and precision of the finite element methods are limited due to mesh distortion. Therefore, the explosive detonation of 2 lighters and even more lighters was numerically simulated with the material point method based on the explicit integration algorithm, to give results fitting the theoretical solution well. The proposed method not only avoids the re-meshing procedure for distorted elements, but also makes an effective way to the numerical simulation of the explosive detonation.

Key words: meshless method; material point method; detonation; numerical simulation

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(10972051;11272081)