

文章编号: 1006-9941(2009)01-0027-05

# 基于完全变光滑长度 SPH 方法的高能炸药爆轰过程数值试验

强洪夫, 王坤鹏, 高巍然

(第二炮兵工程学院 201 室, 陕西 西安 710025)

**摘要:**传统的网格方法在模拟高能炸药(HE)爆炸问题时常会出现网格扭曲等问题,光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics)方法是一种无网格纯 Lagrangian 粒子方法,非常适合求解这类问题。本文应用作者提出的完全变光滑长度 SPH 方法,修正了传统 SPH 法中由于变光滑长度效应所造成的计算误差,其在模拟密度等物理参量变化梯度剧烈的问题时比传统 SPH 法具有更高精度和稳定性;针对一维 TNT 板条爆轰过程和三维 TNT 聚能装药的爆轰过程两个算例进行了数值试验,并与已有的传统 SPH 法数值模拟结果及理论解进行了对比。结果表明,算例一说明该方法较传统 SPH 法在模拟此类问题时具有更高精度,比传统方法计算的 CJ 参数更接近理论值,验证了该方法在爆轰过程模拟的有效性;算例二说明该方法成功地进行了三维 TNT 聚能装药的爆轰过程数值试验,获得了爆轰产物气流的传播特性和喷射规律并符合爆炸理论。

**关键词:**爆炸力学;光滑粒子流体动力学;变光滑长度;聚能装药

**中图分类号:**TJ55; O35; O389

**文献标识码:**A

## 1 引言

光滑粒子流体动力学(SPH)方法是一种无网格粒子方法,能够有效地解决高能炸药(HE)爆轰过程中大变形、大扭曲等网格方法难以解决的问题。最早由 Lucy<sup>[1]</sup>提出并用于解决天体物理学问题,随后在流体力学<sup>[2-3]</sup>、冲击动力学<sup>[4]</sup>等领域中广泛应用<sup>[5]</sup>。Swegle 等<sup>[6]</sup>在水下爆炸问题的模拟中引入 SPH 方法,开始了 SPH 在爆炸领域的应用。Liu 等在这一领域做了很多有意义的工作,分析了水介质对爆炸的缓冲<sup>[7]</sup>,模拟了二维水下爆炸<sup>[8]</sup>,研究了锥孔炸药的起爆<sup>[9-10]</sup>等问题。最近 Kobashi 等<sup>[11]</sup>研究了爆炸对结构的作用。

在 SPH 方法中,光滑长度有着非常重要的意义,决定了 SPH 中核函数的作用范围并直接影响着近似的精度。若值较小则包含在紧支域内的相邻粒子较少,使得插值精度较低;而值较大则无法突出重要粒子的信息,同样会降低计算精度。为了解决这一问题,传统 SPH 方法通常采用变光滑长度的技术,根据粒子自身密度来更新光滑长度,进而保证相对稳定的临近粒子数目。以往一般认为变光滑长度对 SPH 微分近似的影响可以忽略,但对于模拟密度和光滑长度变化剧烈的爆炸冲击问

题,会引入较大的误差,爆炸气体参数的精度不能保证。为了解决这一问题,本文应用完全变光滑长度 SPH 法<sup>[12-14]</sup>,该方法将光滑长度看作受恒定邻近粒子数约束的独立坐标变量,修正了光滑长度变化所引入的偏差。本文以爆炸理论为基础通过一维 TNT 板条的模拟对新方法和传统 SPH 方法作了比较,指出了新方法的优点,并对聚能炸药进行了三维爆轰过程模拟分析。

## 2 爆炸理论

以爆炸过程的试验研究为基础,19 世纪人们开始了爆炸的理论研究,认为爆轰是带化学反应的冲击过程,并且是在通过爆轰波面时瞬时完成,即不考虑爆轰反应区,提出了爆轰的经典模型——CJ 模型。为了能唯一地确定爆轰波的状态,还要建立控制方程和一个状态方程。

Chapman-Jouguet (CJ) 模型将爆轰波简化为含化学反应的强间断面,即稳定爆轰状态对应于 Rayleigh 线同 Hugoniot 线的切点 CJ(图 1),有如下关系:

$$\rho_{CJ} = \frac{k+1}{k} \rho_0 \quad (1)$$

$$p_{CJ} = \frac{1}{k+1} \rho_0 D^2 \quad (2)$$

$$v_{CJ} = \frac{1}{k+1} D \quad (3)$$

式中, $\rho_{CJ}$ ,  $p_{CJ}$ ,  $v_{CJ}$  为 CJ 状态下爆轰产物的密度,压强,速率, $\rho_0$  为炸药初始密度, $D$  为爆轰波速。CJ 模型保证了爆轰波后的稀疏波不至于赶上爆轰波,使得爆轰波能以恒速稳定的传播。

收稿日期:2008-06-18;修回日期:2008-09-17

基金项目:国家教育部 NCET 资助项目;国家 973 资助项目(973-61338);第二炮兵工程学院创新性探索研究资助项目(EPXY0806)

作者简介:强洪夫(1965-),男,博士,教授,博导,国家 973 项目技术首席专家,从事材料与结构的失效行为和高性能数值模拟研究。

e-mail: Qiang@263.net

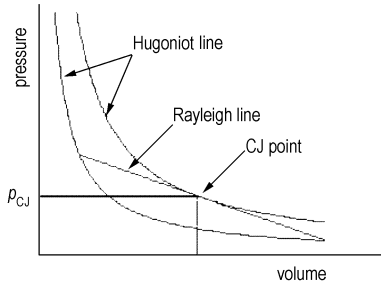


图1 Hugoniot线和Rayleigh线示意图

Fig. 1 Abridged general view of Hugoniot and Rayleigh lines

由于爆轰速度很快,爆轰产物可近似为无粘流体,故控制方程用Euler方程:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \boldsymbol{\nu} \quad (4)$$

$$\frac{D\boldsymbol{\nu}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (5)$$

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{p}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\nu} \quad (6)$$

式中, $\rho, \boldsymbol{\nu}, u, p$ 为爆轰产物的密度、速度、比内能和压强。

爆轰产物状态方程采用能够反映由爆轰到膨胀整个过程的JWL方程<sup>[17]</sup>:

$$p(e, v) = A \left[ 1 - \frac{w}{R_1 v} \right] \exp(-R_1 v) + B \left[ 1 - \frac{w}{R_2 v} \right] \exp(-R_2 v) + \frac{w \rho_0 e}{v} \quad (7)$$

式中, $v = \rho_0/\rho$ 为相对体积, $e$ 为单位质量内能。 $A, B, R_1, R_2, w$ 为常量,与爆炸的环境、材料等因素有关,由实验得到。该状态方程描述了炸药爆轰之后的爆轰产物各物理量之间的关系。首先爆轰产物在高温高压高密度状态下,分子之间的相互作用类似于固体或液体的性态,随着产物的膨胀,压力降到环境气压,分子之间的相互作用又呈现气态。JWL状态方程由三项组成分别在高、中、低压起作用,可以模拟由爆轰到膨胀的整个过程。计算时,根据炸药的爆轰速度对相应的爆轰产物施加该状态方程。

### 3 SPH模拟

#### 3.1 基本原理

SPH的核心是插值,在SPH中任一物理量 $f(\mathbf{r})$ 先用核函数积分插值然后转变为任意粒子排列上的离散<sup>[5]</sup>形式来近似表示:

$$\langle f(\mathbf{r}_i) \rangle = \sum_{j=1}^n \frac{m_j f(\mathbf{r}_j)}{\rho_j} W_{ij} \quad (8)$$

式中, $i, j$ 表示粒子编码, $\mathbf{r}_i$ 为粒子 $i$ 位置矢量, $n$ 为紧

支域内的粒子总数, $m_j, \rho_j$ 分别表示粒子 $j$ 的质量和密度, $W_{ij} = W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j, h)$ 为核函数, $h$ 是定义核函数影响区域的光滑长度。

对式(8)求得 $f(\mathbf{r})$ 的散度估计为:

$$\langle \nabla \cdot f(\mathbf{r}_i) \rangle = \sum_{j=1}^n \frac{m_j}{\rho_j} f(\mathbf{r}_j) \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (9)$$

考虑变光滑长度 $h$ 是空间位置的函数,式中 $\nabla_i W_{ij}$ 表示核函数的空间导数,表达式为:

$$\nabla_i W_{ij} = \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}} \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}} + \frac{\partial W_{ij}}{\partial h} \nabla h \quad (10)$$

其中, $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j, r_{ij} = |\mathbf{r}_{ij}|, \nabla h$ 代表 $h$ 的空间导数,传统SPH方程忽略了式(10)等号右侧的第二项,Nelson<sup>[15]</sup>的研究表明,一般情况下 $\nabla h$ 的影响是可以忽略的,但对于光滑长度分布不均匀或变化剧烈的问题,对 $\nabla h$ 的忽略会造成较大误差,就要考虑在方程中保留该项,避免光滑长度变化带来的计算误差。

#### 3.2 完全变光滑长度SPH方程组

完全变光滑长度SPH法<sup>[12-14]</sup>修正了传统SPH法中由于变光滑长度效应所造成的计算偏差,该方法将光滑长度看作独立的坐标变量,并随粒子的运动而变化,即光滑长度同为空间和时间的函数 $h_i = h(\mathbf{r}_i, t)$ 。为了使计算的邻近粒子数目尽量保持不变,通过无耗散的Lagrangian方程引入该约束条件,并采用对称核近似的方法对变光滑长度核函数近似,基于控制方程组(4-6)最终推导的完全变光滑方程组<sup>[12]</sup>为:

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_{j=1}^n m_j \mathbf{v}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} + \frac{1}{2} \left[ \frac{dh_i}{dt} + \frac{dh_j}{dt} \right] \frac{\partial W_{ij}}{\partial h} \quad (11)$$

$$\frac{Dv_i}{Dt} = - \sum_{j=1}^n m_j \left[ f_i \frac{p_i}{\rho_i^2} + f_j \frac{p_j}{\rho_j^2} \right] + \Pi_{ij} \nabla_i W_{ij} \quad (12)$$

$$\frac{Du_i}{Dt} = \frac{p_i}{\rho_i^2} \sum_{j=1}^n m_j \mathbf{v}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} + \frac{1}{2} \left[ \frac{dh_i}{dt} + \frac{dh_j}{dt} \right] \frac{\partial W_{ij}}{\partial h} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n m_j \Pi_{ij} \mathbf{v}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} + H_i \quad (13)$$

其中光滑长度的动态变化为:

$$\frac{dh_i}{dt} = - \frac{1}{d} \frac{h_i}{\rho_i} \frac{d\rho_i}{dt} \quad (14)$$

$f_i$ 为修正系数由下式表示:

$$f_i = \left[ 1 + \frac{h_i}{d\rho_i} \sum_{j=1}^n m_j \frac{\partial W_{ij}}{\partial h_i} \right]^{-1} \quad (15)$$

$\Pi_{ij}, H_i$ 分别为人工粘度和人工热流,其表达式见文献<sup>[5]</sup>,等式(11)、(12)中光滑长度变化率 $dh_i/dt$ 同密度变化率 $d\rho_i/dt$ 相互关联,本文采用迭代的办法求解密度方程和光滑长度,对于动量方程的修正系数

方程(15),也采用迭代方法求解。

### 4 算例

本文计算时采用 3 次样条核函数式<sup>[16]</sup>,时间步长的推进采用蛙跳格式。

#### 4.1 一维 TNT 板条验证算例

一维爆轰过程常被用来测试模拟爆炸的数值方法<sup>[17]</sup>,本算例模型为 0.1 m 长的 TNT 板条炸药从一端起爆向另一端的传播过程。计算共配置 126 个粒子,初始沿板条均匀分布,状态方程为(7)式 JWL 方程,其中 TNT 材料参数见表 1。

表 1 TNT 材料参数

Table 1 Materials parameters of TNT

| $A/\text{GPa}$                    | $B/\text{GPa}$ | $R_1$                            | $R_2$ | $w$                                |
|-----------------------------------|----------------|----------------------------------|-------|------------------------------------|
| 371.2                             | 3.231          | 4.15                             | 0.95  | 0.3                                |
| reference density $\rho_0$        |                | detonation velocity $D$          |       | internal energy $e_0$              |
| / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ |                | / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ |       | / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ |
| 1630                              |                | 6930                             |       | 4290                               |

分别用传统 SPH 方法和新方法对该算例进行模拟,结果如图 2 所示,横坐标表示沿 TNT 板条的距离,曲线分别是由 1  $\mu\text{s}$  到 14  $\mu\text{s}$  的时间内每隔 1  $\mu\text{s}$  的密度、速度和压力分布曲线,图中粗实线为理论解由 CJ 模型公式(1-3)得出。从结果可以看出新方法比传统方法更接近理论解,在粒子数少的情况下也能达到很高的精度,并且随着爆轰过程的推进,各爆轰参数收敛于理论 CJ 值。

#### 4.2 三维 TNT 聚能装药爆轰模拟算例

在 4.1 算例的基础上,用新算法对聚能装药进行三维模拟。聚能装药是指具有一定几何空腔的柱形 HE

炸药,空腔一般设计成圆锥型空槽(见图 3a)。本文只对无罩聚能炸药的爆轰过程模拟,不考虑药型罩的塑性变形过程和外壳的作用。粒子初始配置(见图 3b),炸药仍选用 TNT,参数同表 1,装药直径 0.08 m,装药头长 0.05 m,锥孔长度为 0.1 m,锥形空腔顶角约为 43.6°。

计算主要关心锥形空腔的聚能作用,因此在配置粒子时尽量保证了空腔内表面的光滑,模型总共配置 77264 个粒子。模拟时采用点起爆方式,起爆点为 (0, 0, 0.15),图 4 给出了在时刻 14.4  $\mu\text{s}$  和 21.6  $\mu\text{s}$ ,过轴线切面的密度分布同 Liu<sup>[17]</sup>的密度对比图,①和②分别表示传统方法和新方法模拟的结果,图 5 为过轴线切面的速度同 Liu<sup>[10]</sup>中速度的对比图,箭头的长度和方向分别表示粒子速度的大小和方向,箭头的起点代表粒子的位置,图 6 为过轴线切面的压强分布同 Liu<sup>[17]</sup>的压强对比图。从图 5 和图 6 可以看出,当爆轰波传到空腔时,粒子以垂直锥孔表面的方向向轴线运动,并在轴线上积聚,压力和速度不断上升达到最大值,最大密度为 2100  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,最大速度在 10.5  $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$  左右,压强达到 14 GPa。然后形成高压、高速的爆轰产物粒子向外喷出,由于压缩气流的径向膨胀作用,气流汇聚后又逐渐偏离轴线而扩散。因此,聚能效应只在一定的范围内起作用,随着离装药距离的增大,聚能效应越来越弱。这同 Liu<sup>[10]</sup>的二维爆轰过程模拟结果相近,不同在于其速度最大值在 7770  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右,压强最大在 10 GPa 左右,比传统方法高 30% ~ 40%,这是因为文献中采用的是二维锥孔装药模拟反映了线型装药的性质,从聚能效应上看,三维锥孔装药对空腔的聚能作用比其更明显。这也符合聚能原理。

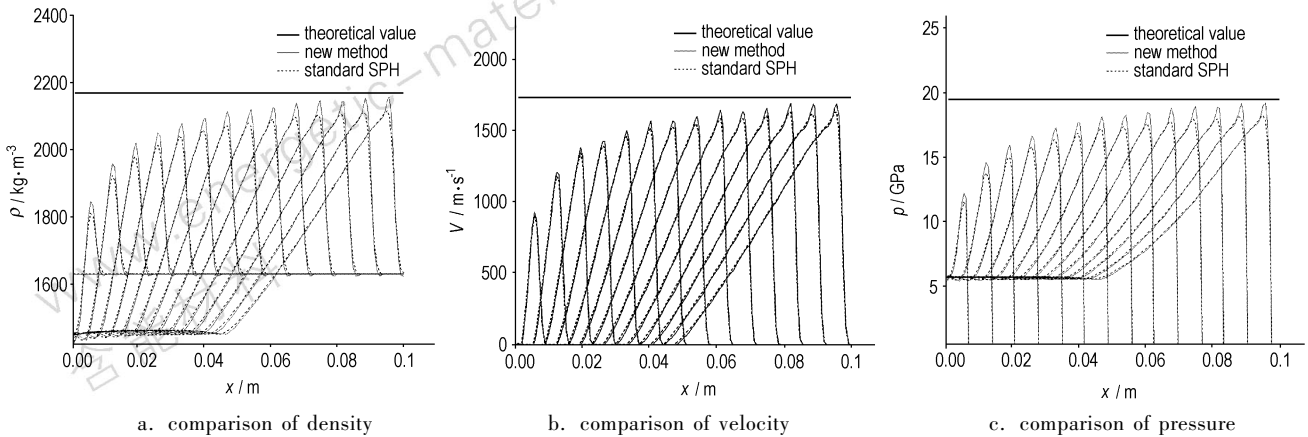


图 2 一维 TNT 板条密度、速度和压力分布对比图

Fig. 2 Comparison profiles of density, velocity and pressure of the 1-D TNT slab during the detonation process from 1  $\mu\text{s}$  to 14  $\mu\text{s}$

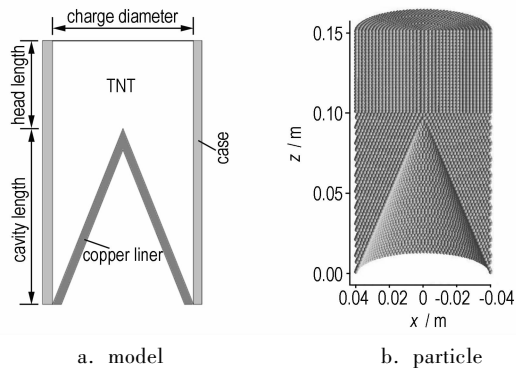


图3 装药模型及粒子配置

Fig.3 Initial geometry (on the left) and particles set-up (on the right) of the explosive model

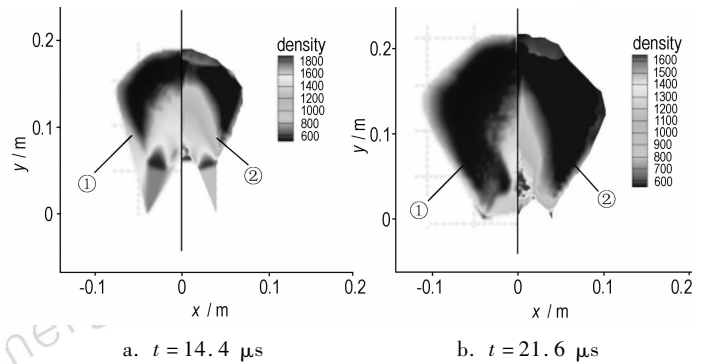


图4 炸药在爆轰过程中的密度分布对比

Fig.4 Comparison of density distribution in detonation process of explosive

- ① density distribution of 2D from G R Liu 2003<sup>[17]</sup>,
- ② density distribution of 3D by the new method

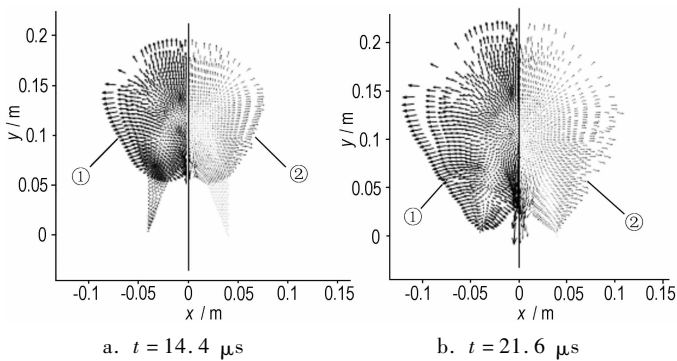


图5 炸药在爆轰过程中的速度分布对比

Fig.5 Comparison of velocity distribution in detonation process of explosive

- ① velocity distribution of 2D from M B Liu 2003<sup>[10]</sup>,
- ② velocity distribution of 3D by the new method

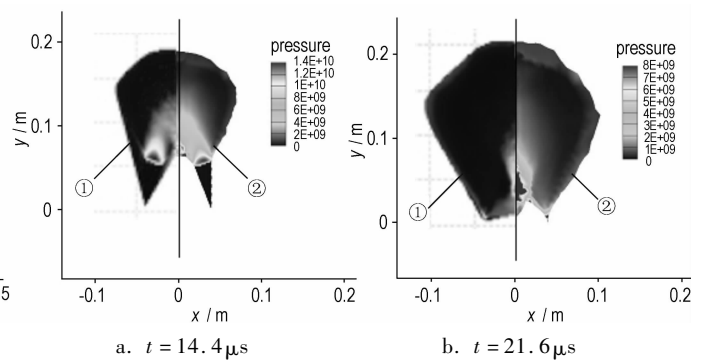


图6 炸药在爆轰过程中的压强分布对比

Fig.6 Comparison of pressure distribution in detonation process of explosive

- ① pressure distribution of 2D from G R Liu 2003<sup>[17]</sup>,
- ② pressure distribution of 3D by the new method

### 5 结论

爆轰过程的研究是爆炸力学的重要研究方向,针对爆轰问题中密度和光滑长度变化剧烈的情况,本文应用完全变光滑长度 SPH 方法来提高计算精度。通过算例的模拟对比,可得到以下结论:

(1) 从 TNT 板条的爆轰模拟来看,新方法在捕捉 CJ 参数上比传统 SPH 方法精度要高,粒子配置少的情况下也能得到较准确的模拟结果,验证了该新方法在爆轰过程模拟的有效性。

(2) 该方法成功地进行了三维 TNT 聚能装药的爆轰过程数值试验,装药空腔具有聚能作用,使高压高速粒子聚集在轴线上,由于膨胀波的作用,气流逐渐向外发散,聚能效应只在一定的范围内起作用。

#### 参考文献:

[1] Lucy L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis [J]. *Astronomical Journal*,1977,82(12): 1013 - 1024.

[2] Sigalotti L D, Klapp J, Sira E, et al. SPH simulations of time-dependent Poiseuille flow at low Reynolds numbers [J]. *Journal of Computational Physics*,2003,191: 622 - 638.

[3] Lohner R, Yang C, Onate E. On the simulation of flows with violent free surface motion [C] // 44th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit,2006.

[4] Johnson G R, Beissel S R. Normalized smoothed functions for SPH impact computations [J]. *Journal of Numerical Methods in Engineering*,1996,39: 725 - 741.

[5] Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics [R]. Reports on Progress in Physics,2005.

[6] Sweigle J W, Attaway S W. On the feasibility of using smoothed particle hydrodynamics for underwater explosion calculations [J]. *Computational Mechanics*,1995,17: 151 - 168.

[7] Liu M B, Liu G R, Lam K Y. Investigations into water mitigation using a meshless particle method [J]. *Shock Waves*,2002,12: 181 - 195.

[8] Liu M B, Liu G R, Lam K Y, et al. Smoothed particle hydrodynamics for numerical simulation of underwater explosion [J]. *Computational Mechanics*,2003,30: 106 - 118.

- [9] Liu M B, Liu G R, Zong Z, et al. Computer simulation of high explosive explosion using smoothed particle hydrodynamics methodology [J]. *Computers & Fluids*, 2003, 32: 305 – 322.
- [10] Liu M B, Liu G R, Lam K Y, et al. Meshfree particle simulation of the detonation process for high explosives in shaped charge unlined cavity configurations [J]. *Shock Waves*, 2003, 12: 509 – 520.
- [11] Kobashi W, Matsuo A. Explosion simulation including a coupled fluid-structure interaction problem using smoothed particle hydrodynamics [C] // 44th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2006.
- [12] QIANG Hong-fu, GAO Wei-ran. A new SPH equation including variable smoothing lengths aspects and its implementation [C] // Proceedings of ISCM 2007. Beijing, 2007: 343.
- [13] 强洪夫, 高巍然. 修正变光滑长度 SPH 方法及其应用 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2007, 8(5): 419 – 424.  
QIANG Hong-fu, GAO Wei-ran. Modified SPH method considering full variable smoothing lengths effects and its applications [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 8(5): 419 – 424.
- [14] 强洪夫, 高巍然. 完全变光滑长度 SPH 法及其实现 [J]. 计算物理, 2008, 25(5): 569 – 575.  
QIANG Hong-fu, GAO Wei-ran. SPH method with full variable smoothing lengths and implementation [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2008, 25(5): 569 – 575.
- [15] Nelson R P, Papaloizou J C. Variable smoothing lengths and energy conservation in smoothed particle hydrodynamics [J]. *Mon Not R astr Soc*, 1994, 270: 1 – 29.
- [16] Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics [J]. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1992, 30: 543 – 574.
- [17] Liu G R, Liu M B 著. 韩旭, 杨刚, 强洪夫译. 光滑粒子流体动力学: 一种无网格粒子法 [M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2005: 190 – 124.

## Numerical Simulation of High Explosive Detonation Process Using SPH Method with Fully Variable Smoothing Lengths

QIANG Hong-fu, WANG Kun-peng, GAO Wei-ran

(No. 201 Staffroom, Faculty of Mechanical and Propulsion Engineering, Xi'an Hi-Tech Institute, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** The numerical simulation of the detonation of a high explosive (HE) is difficult for traditional grid based methods due to the mesh distortion. Smoothed particle hydrodynamics (SPH) method, as a Lagrangian particle method, is a best candidate method to solve this kind of problem. Modified SPH method presented by the authors with fully variable smoothing length corrects the variable smoothing length effects of standard SPH method in essence, and improves the simulation precision and stability in the large density gradient problem. 1D TNT slab detonation and 3D TNT shaped charge were simulated with the new method and compared with the standard SPH method and theoretical value. The results show that the new SPH method improves the precision and computes the CJ value more correctly. With the numerical simulation for detonation process of the 3D TNT shaped charge, the properties and the rule of the gaseous detonation products were obtained. The results accord with the explosion theoretical value.

**Key words:** explosion mechanics; smoothed particle hydrodynamics (SPH); fully variable smoothing length; shaped charge