

文章编号: 1006-9941(2018)03-0237-06

两种算法模拟炸药撞击响应特性的对比分析

章猛华, 阮文俊, 余永刚

(南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了更有效地模拟炸药的撞击响应特性, 为炸药的安全性预测提供可靠数据, 采用有限元法(FEM)及 FEM 与光滑粒子(FEM-SPH)耦合算法分别对炸药的跌落试验及 Steven 试验进行了数值模拟, 对各种算法的优缺点进行了讨论及对比分析。结果表明, FEM-SPH 耦合算法能够更有效地模拟粘性炸药受撞后的力学响应问题, 且精度更高。在跌落试验的模拟中, FEM-SPH 耦合算法得到的压力及过载曲线的上升速率与实测值更接近, 最大压力误差约 4%, 而 FEM 的误差为 16%; 在 Steven 试验的模拟中, FEM-SPH 耦合算法得到的压力时程曲线与试验值更吻合, 压力积分值与试验值偏差约 10.7%, 而 FEM 的偏差为 29%, 炸药受撞击后的现象也与试验较相似。FEM-SPH 耦合算法能够在一定程度上表现出粘性及颗粒材料在撞击加载过程中的相对滑移及流动特性, 对于模拟粘性炸药在受撞击后产生大变形的问題有一定优势。

关键词: 炸药; 撞击响应; 数值模拟; FEM-SPH 耦合算法

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.03.006

1 引言

炸药的安全性一直是军事科学重点关注的问题。在处理、制造、存储和运输的过程中, 即使是受到较低速度的撞击, 固体高能炸药也可能被引燃, 甚至升级为更危险的爆炸事故。国内外发展了多种预测炸药受意外撞击的安全性试验, 如 Steven^[1]、Susan^[2-3]、落锤^[4]和跌落^[5]等试验。

由于武器装置易受意外撞击, 以实验手段全面预测含能材料的安全性成本较高。随着高科技信息技术的发展, 数值模拟由于成本低, 不受测试技术限制, 成为有效模拟炸药撞击响应特性的重要手段。

炸药的撞击响应特性模拟在 20 世纪 80 年代就有相关研究, Boyle 等^[6]通过动压剪切装置对炸药的点火阈值做了一维预测。Partom^[7]在 Boyle 预测的基础上使用了二维模拟, 采用压力和塑性剪切应变率的瞬时乘积值来预测临界点火情况, 通过比较 Susan 试验和 Steven 试验得到 LX-04 炸药撞击点火的阈值速度, 但是压力和应变率的瞬时乘积并不能全面预测炸

药的安全性。Browning^[8-9]和 Scammon 等^[10]根据恒定热流量假设, 结合点火时间、宏观压力和塑性剪切应变率, 得到炸药撞击点火的幂次函数, 时间项使数值模拟数据更有效印证了试验结果。Gruau 等^[11-12]在 Browning 判据的基础上, 采用类混凝土本构模型, 对 Steven 试验进行数值模拟, 由于本构模型不能完整地表现出炸药的力学特性, 导致数值计算结果与实测数据有一定误差, 但是基本能够满足炸药安全性预测的要求。Ma 等^[13]使用有限元分析软件, 以应力和应变率乘积的积分形式表征了 PBX 炸药的撞击点火阈值。以上研究从压力、应变率和加载时间等方面预测炸药的安全性, 但均基于有限元方法(FEM)对炸药的撞击响应特性进行分析, 而 FEM 在涉及大变形及材料发生塑性流动的情况下计算精度欠佳。针对这一不足, 研究者发展了多种无网格算法, 包括光滑粒子(SPH)法、物质点法(MPM)和离散元法(DEM)等^[14]。SPH 法以 SPH 粒子替代有限元网格, 可以从根本上避免 FEM 因网格畸变造成的计算不收敛问题。但是, SPH 法需耗费大量计算机资源, 计算效率远低于 FEM, 在工程运算中受到较大的限制。

本研究结合 FEM 与 SPH 法的优点, 采用有限元法与光滑粒子(FEM-SPH)耦合算法对粘性炸药的撞击响应特性进行分析, 对比 FEM 的计算结果, 验证 FEM-SPH 耦合算法在模拟粘性炸药受撞击问题中的

收稿日期: 2017-06-27; 修回日期: 2017-08-07

基金项目: 国防预研基金项目(402070207)

作者简介: 章猛华(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事终点效应及高效毁伤研究。e-mail: zmhalt@163.com

通信联系人: 阮文俊(1964-), 男, 教授, 主要从事武器系统总体研究。e-mail: ruanwj@njust.edu.cn

优越性。

2 计算方法

传统 FEM 在处理大变形问题时有两种方法。第一种为采用侵蚀算法, 即当网格变形较大时删除畸变网格单元, 如图 1 所示, 加载过程中 3 和 7 节点产生较大位移, 网格变形量达到失效值, 网格将被删除, 但是网格的删除, 不能反映该处的实际行为, 对加载的响应特性影响较大^[15]。

第二种为采用共用网格节点随机分离技术^[16], 即对不同网格中相同位置的节点建立节点组元, 设置各个节点分离的失效应变值, 当网格发生较大变形时 (达到设置的失效值), 网格间的节点发生分离, 网格分离过程如图 2 所示, 但是这样处理同样避免不了单个有限元网格因畸变而导致计算不收敛的问题。

在 FEM-SPH 耦合算法中, SPH 粒子与有限元单元面是采用主从节点耦合的算法, 即将 SPH 粒子看成是从节点, 将有限元节点作为主节点, 以点面算法来处

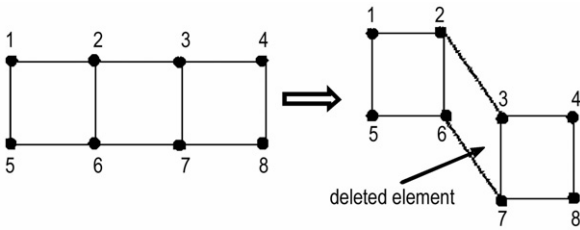


图 1 畸变网格删除过程示意图^[16]

Fig.1 Sketch of the deleted process for distortion mesh

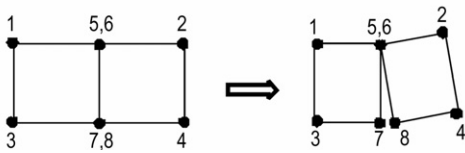


图 2 节点分离过程示意图

Fig.2 Sketch of nodes separation process

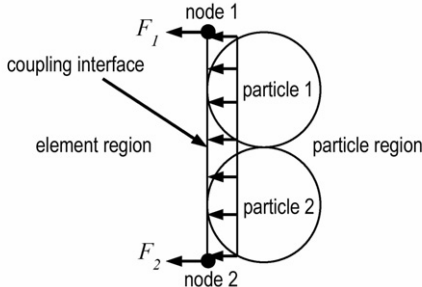


图 3 粒子对单元节点作用力示意图

Fig.3 Sketch of the forces on element nodes from particles

理接触力。对于每一条位于耦合界面的单元边, 根据与它关联的粒子的应力确定一个等效的面力, 并认为其均匀作用在单元边上, 粒子对单元节点作用力示意图如图 3 所示。

为了印证 FEM-SPH 耦合算法能够更准确地模拟炸药类颗粒材料的撞击响应特性, 采用不同算法分别对跌落试验及 Steven 试验进行数值分析。

3 数值计算模型

3.1 物理模型

跌落试验装置详细参数见文献[5], 对模型进行适当简化, 简化后的 FEM 计算模型及 FEM-SPH 耦合计算模型如图 4 所示。

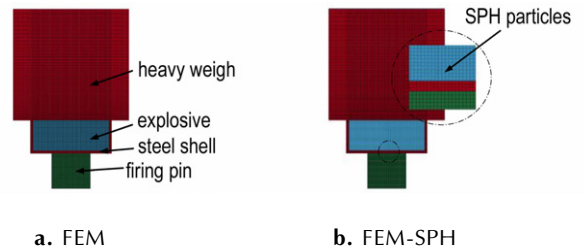


图 4 跌落试验计算模型

Fig.4 Calculation model of the drop test

Steven 试验装置详细参数见文献[17], 对模型进行适当简化, 考虑到炸药及聚四氟乙烯 (PTFE) 环在撞击过程中形变均较大, 对 FEM-SPH 耦合算法模型中的炸药及聚四氟乙烯环分别填充 SPH 粒子, 得到 FEM 模型及 FEM-SPH 耦合模型如图 5 所示。

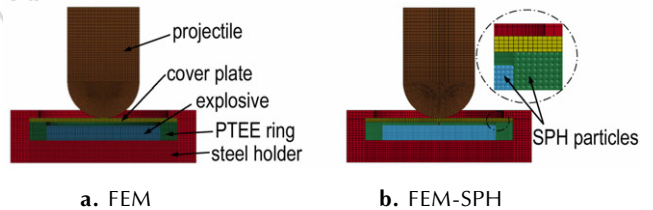


图 5 Steven 试验计算模型

Fig.5 Calculation model of the Steven test

3.2 材料模型

壳体、撞针及弹丸为 Q235 钢, 采用 Johnson-cook 模型, 相关材料参数见表 1^[18]。状态方程参数为 $C = 4569 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $S = 1.49$, $\gamma = 2.17$ ^[19]。对炸药和聚四氟乙烯环采用随动塑性模型, 硬化系数选为 1.0 (材料采用各向同性硬化模型), 具体参数如表 2 所示。

表 1 钢外壳、撞针及弹丸材料参数

Table 1 Material parameters for steel shell, firing pin and projectile

ρ /g · cm ⁻³	G /GPa	ν	A /MPa	B /MPa	n	c	m
7.85	78.9	0.3	245	900	0.94	0.0391	0.1515

Note: ρ is the density; G is the shear modulus; ν is the Poisson's ratio; A, B, n, c and m are J-C constants.

表 2 炸药和 PTFE 材料参数

Table 2 Material parameters for explosives and PTFE

material	ρ /g · cm ⁻³	E /GPa	ν	σ /MPa	β
PBX-2 ^[20]	1.84	10.1	0.30	44.85	1.0
Comp.B ^[21]	1.65	4.1	0.38	60	1.0
PTFE ^[11]	2.15	0.4	0.463	14	1.0

Note: ρ is the density; E is the elastic modulus; ν is the Poisson's ratio; σ is the yield stress; β is the hardening parameter.

4 计算结果及分析

4.1 跌落试验计算结果及分析

在跌落试验有限元节点分离技术的模拟中,由于炸药单元变形较大,节点分离后形成较多单独的六面体单元,这些分离的六面体单元受到持续的载荷作用,相互之间发生碰撞产生较大的网格畸变,计算不容易收敛,较难得到有效撞击响应数据,而且在网格数与粒子数相等的条件下,节点分离法计算时长比 FEM-SPH 耦合算法要长,所以下面重点对 FEM 和 FEM-SPH 耦合算法进行分析。

跌落试验模拟中,FEM、FEM-SPH 耦合算法及实验得到的压力曲线和过载曲线分别如图 6 和图 7 所示。从图 6 和图 7 可以得出,试验得到的最大压力出现在撞击后 735 μs ,最大压力为 0.162 GPa,最大过载出现在撞击后 775 μs ,最大过载为 25400 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; FEM-SPH 耦合算法最大压力出现在 760 μs 左右,最大压力为 0.156 GPa,最大压力误差为 4% 左右,最大过载出现在撞击后 745 μs ,最大过载为 23400 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,FEM-SPH 耦合算法结果与实测值比较吻合; 而 FEM 得到的最大压力则出现在 485 μs 左右,最大压力为 0.136 GPa,最大压力误差为 16% 左右,最大过载出现在撞击后 570 μs ,最大过载为 25010 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。FEM 最大压力和最大过载出现时间明显比试验结果靠前,曲线斜率较大,造成这个误差主要是因为炸药由含能颗粒和少量粘结剂组成,其在受到撞击的过程中,内部颗粒发生相对滑动,表现出一定的流动特性,而有限元 Lagrange

网格不能表现出炸药单元间相对滑移的特性,所以压力上升速率较快,最大压力和过载持续时间较长,加载总时长也相对较短。

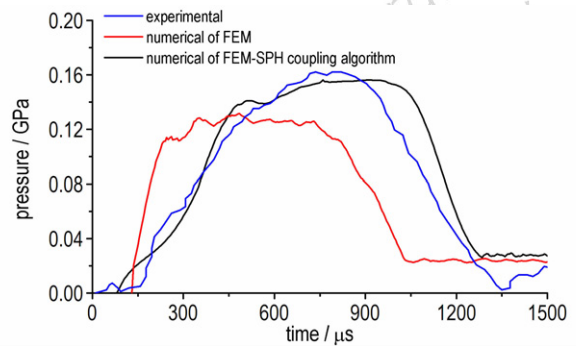


图 6 试验与数值模拟压力-时间曲线的对比

Fig.6 Comparison of pressure-time curves between experimental and numerical simulation

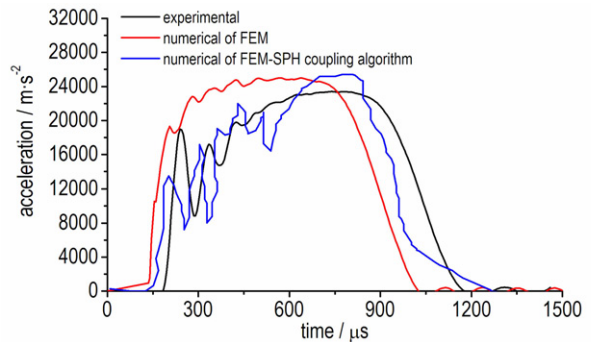


图 7 试验与数值模拟加速度-时间曲线的对比

Fig.7 Comparison of acceleration-time curves between experimental and numerical simulation

应变对炸药的安全性预测非常重要,两种算法在计算 500 μs 时的塑性应变云图如图 8 所示。由图 8 可以看出,在炸药受撞击的中心,两种算法的炸药应变云图较为相似,但是由于 FEM 不能有效模拟颗粒材料内部的塑性流动特性,使得炸药与钢壳拐角处的边界出现应力集中,此处单元应变较大,对炸药的安全性预测产生一定的干扰。

4.2 Steven 试验计算结果及分析

根据文献[17]的试验数据,对 184.2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 229.6 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 两种速度下的 Steven 试验分别进行模拟,FEM、FEM-SPH 耦合算法及实验得到的压力数据如图 9 所示。从图 9 可以看出,在较高的撞击速度下,FEM-SPH 耦合算法压力曲线震荡较大,这是由于 SPH 粒子受压后产生相对滑动使粒子受力不均匀,但是压力曲线总体趋势与试验结果较为吻合。在较高速度的

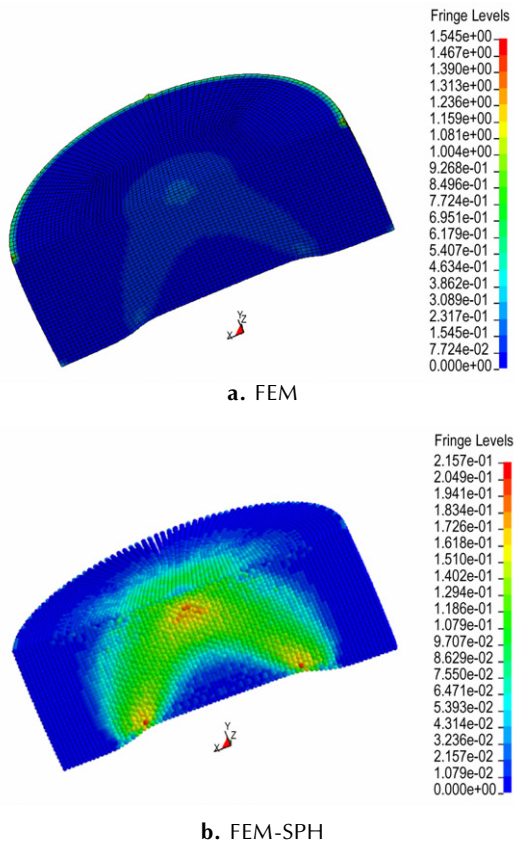


图 8 500 μs 时 FEM 和 FEM-SPH 耦合算法炸药应变云图

Fig.8 Strain contours on explosive of FEM and FEM-SPH coupling algorithm at 500 μs

撞击下, FEM 得到的压力上升速率较快, 压力保持平稳的时间较长, 与 4.1 中 FEM 计算的跌落试验压力趋势基本相似。炸药的安全性不仅与压力的瞬时值相关, 也与压力的时程相关, 对速度为 $184.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 撞击情况下的压力时程曲线进行积分, 由于在 $50 \mu\text{s}$ 之后炸药可能发生爆炸(爆燃), 所以对 $0 \sim 50 \mu\text{s}$ 之间的压力曲线进行积分, Steven 试验、FEM-SPH 耦合算法及 FEM 得到的压力积分值分别为 10, 8.93 $\text{GPa} \cdot \mu\text{s}$ 和 $7.11 \text{ GPa} \cdot \mu\text{s}$, FEM-SPH 耦合算法与试验的误差为 10.7%, FEM 为 29%, FEM-SPH 耦合算法结果更理想。

对于在 $229.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度下的 Steven 试验的模拟, 分别选取 FEM 和 FEM-SPH 耦合算法计算 $50 \mu\text{s}$ 时炸药的应变云图, 如图 10 所示, 两种算法得到的炸药应变云图较为相似。但 FEM-SPH 耦合算法得到的炸药最大应变出现在弹丸撞击的下方, 而 FEM 得到的最大应变出现在被“挤出”的撞击边缘部分, 这是由于采用连续 Lagrange 网格, 不能有效地表现出材料内部的塑性流动特性, 导致此处网格单元变形较大。

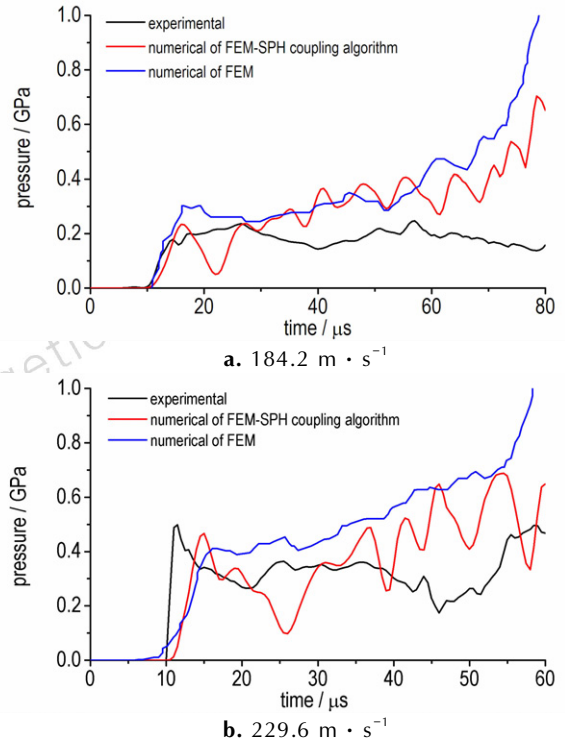


图 9 不同撞击速度下试验与数值模拟压力时程曲线的对比
Fig.9 Comparison of pressure histories curves between experiment and numerical simulation under different impact velocity

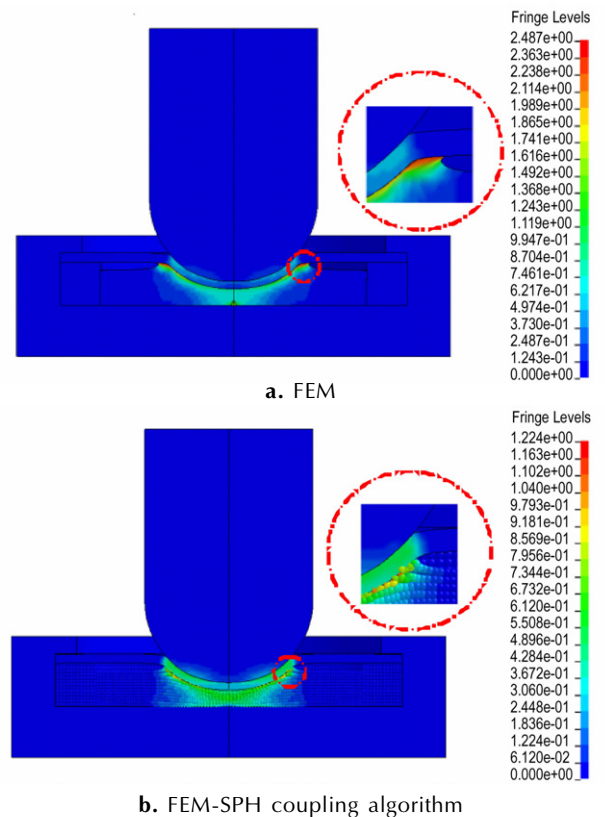


图 10 50 μs 时 FEM 和 FEM-SPH 耦合算法的炸药应变云图
Fig.10 Strain contours on explosive of FEM and FEM-SPH coupling algorithm at 50 μs

对未爆试验回收的炸药样品进行分析可知,炸药受撞击后发生较大塑性流动,FEM-SPH 耦合算法模拟的炸药变形特点与实际情况较接近,如图 11 所示。

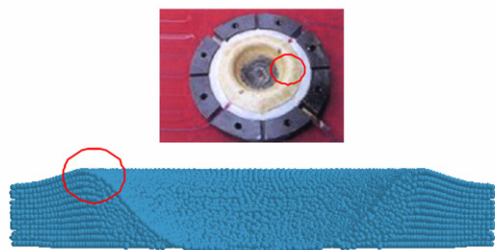


图 11 试验与 FEM-SPH 耦合算法模拟现象对比

Fig.11 Comparison between experimental and phenomenon of FEM-SPH coupling algorithm

5 结 论

(1) 在跌落试验的数值模拟中,FEM-SPH 耦合算法得到的压力曲线及过载曲线与测量值较接近,最大压力误差约 4%;而 FEM 得到的压力及过载曲线上升速率均较快,最大压力的误差约 16%,FEM-SPH 耦合算法结果更为理想。

(2) 在 Steven 试验的数值模拟中,由于 SPH 粒子间会产生相对滑动,FEM-SPH 耦合算法得到的压力曲线虽然震荡较大,但总体趋势与试验结果吻合较好。FEM-SPH 耦合算法及 FEM 的压力积分值与试验偏差分别为 10.7%和 29%。FEM-SPH 耦合算法与试验未爆炸药的撞击变形特点符合较好。

(3) FEM-SPH 方法能够在一定程度上描述颗粒类材料在加载过程中颗粒相互滑移及流动的特性,同时 FEM-SPH 耦合算法提高了总体计算效率,对于模拟材料产生较大塑性流动的问题有一定优势。采用 FEM-SPH 耦合算法能够更有效地对粘性炸药的安全性预测提供数据支持。

参考文献:

- [1] Chidester S K, Green L G, Lee C G. A frictional work predictive method for the initiation of solid high explosives from low-pressure impacts[C]//10th International Symposium on Detonation, Boston, Boston Office of Naval Research, 1993: 786-792.
- [2] Asay B. Shock wave science and technology reference library, Vol. 5: Non-shock initiation of explosives[M]. Heidelberg: Springer, 2009: 555-577.
- [3] 代晓淦,韩敦信,向永,等.苏珊试验中弹体形变的测量和模拟计算[J].含能材料,2004,12(4):235-238.
DAI Xiao-gan, HAN Dun-xin, XIANG Yong, et al. The measurement and numerical simulation of the projectile deformation in susan test[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(4): 235-238.
- [4] Walley S M, Field J E, Biers R A, et al. The use of glass anvils in drop-weight studies of energetic materials[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2015, 40(3): 351-365.
- [5] 代晓淦,申春迎,文玉史.模拟跌落撞击下 PBX-2 炸药的响应[J].含能材料,2011,19(2):209-212.
DAI Xiao-gan, SHEN Chun-ying, WEN Yu-shi. Reaction of PBX-2 explosive under simulated drop impact[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(2): 209-212.
- [6] Boyle V, Frey R B, Blake O. Combined pressure shear ignition of explosives[C]//9th International Symposium on Detonation, Portland, DTIC, 1989: 3-17.
- [7] Partom Y. A threshold criterion for impact ignition[C]//12th International Symposium on Detonation, San Diego, CA, 2002: 244-248.
- [8] Browning R V. Microstructural model of mechanical initiation of energetic materials[C]//Shock Waves in Condensed Matter, New York, 1995: 405-408.
- [9] Browning R V, Scammon R J. Microstructural model of ignition for time varying loading conditions[C]//Shock Waves in Condensed Matter, New York, 2001: 987-990.
- [10] Scammon R J, Browning R V, Middleditch J, et al. Low amplitude insult project: structural analysis and prediction of low order reaction[C]//11th International Symposium on Detonation, VA, 1998: 111-118.
- [11] Gruau C, Picart D, Bianchi C, et al. Simulation of PBX when submitted to low velocity mechanical impacts[C]//17th Dymat technical Meeting, Cambridge, 2007: 105-114.
- [12] Gruau C, Picart D, Belmas R, et al. Ignition of a confined high explosive under low velocity impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36: 537-550.
- [13] Ma D Z, Chen P W, Zhou Q, et al. Ignition criterion and safety prediction of explosives under low velocity impact[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(11): 113505.
- [14] 张雄,刘岩,马尚.无网格法的理论及应用[J].力学进展,2009,39(1):1-36.
ZHANG Xiong, LIU Yan, MA Shang. Mesh-free methods and their applications[J]. *Advances in Mechanics*, 2009, 39(1): 1-36.
- [15] 乐莉,闫军,钟秋海.超高速撞击仿真算法分析[J].系统仿真学报,2004,16(9):1941-1943.
YUE Li, YAN Jun, ZHONG Qiu-hai. Simulations of debris impacts using three different algorithms[J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(9): 1941-1943.
- [16] 王晨,陈朗,鲁峰,等.炸药跌落响应数值模拟分析[J].含能材料,2012,20(6):748-753.
WANG Chen, CHEN Lang, LU Feng, et al. Numerical simulation for spigot tests[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(6): 748-753.
- [17] 代晓淦,文玉史,李敬明. Steven 试验中含 TNT 类炸药的响应特性[J].火炸药学报,2011,34(3):48-51.
DAI Xiao-gan, WEN Yu-shi, LI Jing-ming. Reaction characteristics for explosive containing TNT in Steven test[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2011, 34(3): 48-51.
- [18] 林莉,支旭东,范锋,等.Q235B 钢 Johnson-Cook 模型参数的确定[J].振动与冲击,2014,33(9):153-158.
LIN Li, ZHI Xu-dong, FAN Feng, et al. Determination of parameters of Johnson-Cook models of Q235B steel[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(9): 153-158.

- [19] 李维新. 一维不定常流与冲击波[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 213.
- [20] Xiaogan D, Yushi W, Miaoping W, et al. Projectile impact ignition and reaction violent mechanism for HMX-based polymer bonded explosives at high temperature[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2017. 42(7): 1-11.
- [21] 袁俊明, 刘玉存, 曹文军. B炸药落锤撞击点火的数值模拟[J]. 含能材料, 2013, 21(1): 30-34.
- YUAN Jun-ming, LIU Yu-cun, CAO Wen-jun. Numerical simulation of drop weight impact ignition on composite explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(1): 30-34.

Comparative Analysis of Two Algorithms for Simulating the Impact Response Characteristics of Explosives

ZHANG Meng-hua, RUAN Wen-jun, YU Yong-gang

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To simulate the impact response characteristics effectively and provide reliable data for the safety prediction of explosives, the numerical simulations of the drop test and the Steven test of explosive were performed by the finite element method (FEM) and the coupling algorithm of FEM and smoothed particale hydrodynamics (FEM-SPH) and the discussion and comparative analysis for the advantages and disadvantages of all kinds of algorithms were carried out. Results show that the FEM-SPH coupling algorithm can more effectively simulate the mechanical response problem of viscous explosives after being impacted and the accuracy is higher. In the simulation of drop test, the ascending rates of pressure curve and overloading curve obtained by FEM-SPH coupling algorithm are closer to the measured values. The maximum pressure error is approximately 4%, while the error of FEM is 16%. In the simulation of Steven test, the pressure history curve obtained by FEM-SPH coupling algorithm is more consistent with the testing value. The deviation of the pressure integral value and the experimental value is approximately 10.7%, whereas the deviation of FEM is 29%, and the phenomenon after being impacted is more similar to real test situation. FEM-SPH coupling algorithm can show the relative slippage and flow characteristic of viscous materials and granular ones in the process of impact loading in a certain degree, the problems of simulating large deformation of viscous explosives after being impacted have certain advantages.

Key words: explosive; impact response; numerical simulation; FEM-SPH coupling algorithm

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.03.006