

物质点法在爆轰波碰撞炸药猛度试验中应用

缪玉松^{1,2}, 李晓杰^{*1,2}, 王宇新^{1,2}, 闫鸿浩^{1,2}, 王小红^{1,2}

(1. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 使用常规有限元法对炸药爆轰过程进行数值计算时, 网格大尺度畸变, 往往导致求解精度低, 甚至求解失败的情况. 采用同时兼顾拉格朗日方法和欧拉方法优点的物质点法(MPM)对爆轰波碰撞炸药猛度试验进行数值计算, 得出爆轰波碰撞过程及其在铅柱中传播的应力、应变分布. 与试验结果进行对比得知, 铅柱压缩误差仅为 0.17%. 由此验证了物质点法在炸药猛度试验应用中的准确性, 为爆轰波传播、碰撞过程分析及炸药猛度测试提供了一种新方法.

关键词: 物质点法; 爆轰波碰撞; 炸药猛度; 铅柱压缩法

中图分类号: O389

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201703002

0 引言

爆轰波碰撞是利用高爆速炸药快速燃烧形成的空腔, 使得低爆速主装药的爆轰波在该空腔内碰撞形成聚能效应的方法. 该方法不仅避免了有金属聚能罩和无罩聚能装药的烦琐程序和钻孔空间的浪费, 还具有方向可控、能量集中和爆压增强的多重特点. 在民用爆破工程中, 可达到降低劳动消耗、二次破碎成本和工程费用, 使施工效率大幅提高的目的.

在超音速、超高压爆轰波碰撞及应力波传播问题的研究中, 数值模拟比其他方法更能直观地反映爆轰波和冲击波的传播、碰撞过程. 但现有的有限元方法在求解的过程中, 往往由于网格大变形使求解的稳定时间积分步长变得极小, 导致求解失败. 另外, 网格畸变可能使网格单元产生负体积, 致使计算无法继续进行. 即使应用避免网格大变形问题的欧拉方法, 由于非线性对流项的影响, 也难于精确地描述物质界面^[1-3].

物质点法(material point method, MPM)作为一种最前沿的物质质点参数的研究方法, 起源于流体力学领域的质点网格法, 它的数学基础是基于偏微分方程的弱形式求解^[4]. 因其同时兼备拉格朗日方法和欧拉方法的优点, 避免了应用拉

格朗日方法求解大变形问题产生的严重网格畸变和欧拉方法难以描述材料上场变量的时间历程, 被广泛应用于处理大变形及多介质耦合问题^[5-6].

本文首先简要介绍物质点法的求解方程和基本原理, 然后应用该方法对爆轰波碰撞炸药猛度试验进行三维数值模拟, 引用相关材料参数和不同介质间的耦合计算, 分别对炸药和钢片飞散历程、铅柱在冲击波作用下的应力、应变演变过程进行研究分析. 最后, 将数值结果与试验结果进行对比, 验证所提方法的准确性, 为爆轰波传播和碰撞历程研究及炸药猛度测试提供一种新的数值方法.

1 物质点法求解原理

如果不考虑热传导效应, 物质点法在冲击动力学中应满足三大守恒方程^[7-8]:

(1) 连续性方程

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

式中: $\mathbf{v} = \mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$ 是物质点速度矢量, $\rho = \rho(\mathbf{x}, t)$ 是质量密度, $\nabla \cdot \mathbf{v}$ 是速度域 $\mathbf{v}$ 的散度.

(2) 动量方程

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

式中: $\mathbf{a}$ 是加速度, $\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, t)$ 是 Cauchy(柯西)应

力张量, $\mathbf{b}$ 是单位质量的体力。

(3) 能量方程

$$\rho \frac{de}{dt} = \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{b} \quad (3)$$

式中: e 是现时构型的单位质量内能, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}(\mathbf{x}, t)$ 是应变率张量。

如果把物质点看作在任何时刻都不变化的质量集中点, 则连续性方程(1)自然满足, 以试函数 w 乘式(2)并在区域 Ω 内积分, 得式(2)的弱形式^[9-10]为

$$\int_{\Omega} \rho w \cdot \mathbf{a} dV + \int_{\Omega} \rho \boldsymbol{\sigma}^s : \nabla w dV = \int_{\Omega} \rho \mathbf{b} \cdot w dV + \int_{\Gamma} \boldsymbol{\tau} \cdot w dS \quad (4)$$

式中: dV 和 dS 分别表示微分体积元和面积元; $\boldsymbol{\sigma}^s$ 为比应力张量 ($\boldsymbol{\sigma}^s = \boldsymbol{\sigma}/\rho$); Γ 为指定应力的边界, 此边界上应力为 $\boldsymbol{\tau}$, 在指定的位移边界上 w 为零。

物质点法将连续体离散为一系列的物质点, 它们携带了各种物理量, 并根据所受的内力和外力在背景网格中运动。每个物质点的质量在整个求解过程中不变, 故满足质量守恒方程。则密度可近似表示为 Dirac δ 函数, 形式如下:

$$\rho(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=1}^{N_i} m_i \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i^t) \quad (5)$$

式中: N_i 是离散的物质点的数量, m_i 是物质点质量, $\mathbf{x}_i^t$ 是 t 时刻物质点的物质矢量。

将式(5)代入动量方程的弱形式(4), 可得到如下求和形式:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{N_i} m_i w(\mathbf{x}_i^t, t) \cdot \mathbf{a}(\mathbf{x}_i^t, t) = \\ & \sum_{i=1}^{N_i} m_i \boldsymbol{\sigma}^s(\mathbf{x}_i^t, t) : \nabla w|_{\mathbf{x}_i^t} + \\ & \sum_{i=1}^{N_i} m_i w(\mathbf{x}_i^t, t) \cdot \boldsymbol{\tau}^s(\mathbf{x}_i^t, t) / h + \\ & \sum_{i=1}^{N_i} m_i w(\mathbf{x}_i^t, t) \cdot \mathbf{b}(\mathbf{x}_i^t, t) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: h 为边界层厚度, $\boldsymbol{\tau}^s$ 为比边界应力 ($\boldsymbol{\tau}^s = \boldsymbol{\tau}/\rho$)。

为了求解计算网格上的动量方程和空间梯度, 需要布置固定于空间的单元网格, 用网格节点参数(位移、速度、加速度等) φ_p^t 进行映射计算可得物质点的相关参数, 可表示为

$$\varphi_i^t = \sum_{p=1}^{N_p} \varphi_p^t N_p(\mathbf{x}_i^t) \quad (7)$$

考虑到试函数的任意性, 最终运动方程可写成下面的节点离散形式:

$$m_p^t \mathbf{a}_p^t = (\mathbf{f}_p^t)^{\text{int}} + (\mathbf{f}_p^t)^{\text{ext}}; \quad p=1, 2, \dots, N_p \quad (8)$$

式中节点集中质量矩阵为

$$m_p^t = \sum_{i=1}^{N_i} m_i N_p(\mathbf{x}_i^t) \quad (9)$$

节点内力矢量为

$$(\mathbf{f}_p^t)^{\text{int}} = - \sum_{i=1}^{N_i} m_i \boldsymbol{\sigma}_i^{s,t} \cdot \nabla N_p \Big|_{\mathbf{x}_i^t} \quad (10)$$

节点外力矢量为

$$(\mathbf{f}_p^t)^{\text{ext}} = \mathbf{b}_p^t + \mathbf{c}_p^t \quad (11)$$

$$\mathbf{b}_p^t = \sum_{i=1}^{N_i} m_i \mathbf{b}(\mathbf{x}_i^t, t) N_p(\mathbf{x}_i^t) \quad (12)$$

$$\mathbf{c}_p^t = \sum_{i=1}^{N_i} m_i \boldsymbol{\tau}_i^{s,t} N_p(\mathbf{x}_i^t) / h \quad (13)$$

物质点法一个完整的计算循环通常有^[11-12]:

(1) 初始化阶段, 将物质点所携带的信息参数映射到背景网格节点上, 求解网格节点的内力和外力; (2) 拉格朗日计算阶段, 在背景网格上积分动量方程, 获得网格节点的运动信息, 并将其映射到物质点; (3) 重新计算阶段, 根据材料本构方程获得物质点上的信息并进行更新, 在下一时间步计算时丢弃变形的背景网格, 并启用更新规则后的背景网格。由于在整个计算过程中背景网格固定不变, 避免了数值计算时对网格的依赖。

2 炸药猛度试验模拟

2.1 计算模型建立

由于牛皮纸在试验过程中主要是用来制作纸筒装填炸药, 相对于高爆轰的炸药爆炸, 其所产生的影响可以忽略, 并假设试验在一个绝热的环境下进行。为了求解的真实性, 模型按铅柱压缩试验参数设定, 铅柱直径为 40 mm, 高度为 60 mm; 钢板直径为 41 mm, 高度为 10 mm; 炸药直径为 40 mm, 高度为 42 mm。建立计算模型如图 1 所示。

应用物质点法前处理程序 SPM 2.0 划分三维网格单元, 每个单元内取 8 个物质点, 导爆索作为起爆药从药柱的对称端插至炸药底部。介质间采用下式进行耦合计算^[13]:

$$f_i \propto \sum_f (\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_f) V_{f,p} + \sum_g (\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_g) V_{g,p} \quad (14)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}_f$ 和 $\boldsymbol{\sigma}_g$ 分别为流体和固体质点的应力, $V_{f,p}$ 和 $V_{g,p}$ 分别为流体和固体的体积。由于节点力总是从流体和固体质点力获得的, 能够自动满足无滑移接触条件, 避免了介质粒子间的物理穿透和掺杂现象。

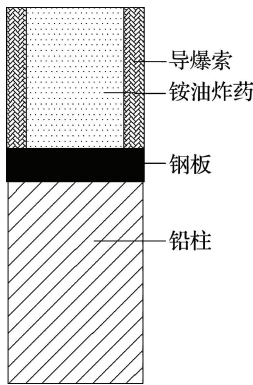


图 1 炸药猛度试验及计算模型示意图

Fig. 1 The schematic diagram of explosive brisance test and numerical model

2.2 材料参数选择

导爆索和铵油炸药采用 High_Explosive_Burn 高能炸药材料模型和 JWL 状态方程,其形式如下:

$$p=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{\omega e_0}{V}\tag{15}$$

式中: e_0 为单位质量热力学能; V 为相对体积; p 为爆轰压力;其他参数为与炸药相关的材料参数,导爆索和铵油炸药的材料参数见表 1.

铅柱采用 John-Cook 本构模型和 Gruneisen 状态方程,John-Cook 本构模型表达式为

$$\sigma=(A+B\bar{\epsilon}^n)(1+C\ln \dot{\epsilon}^*)\left[1-\left(\frac{T-T_r}{T_m-T_r}\right)^m\right]\tag{16}$$

式中: $\bar{\epsilon}^p$ 为等效塑性应变, $\dot{\epsilon}^*$ 为等效塑性应变率, T_m 为熔化温度, T_r 为外界温度,其他为与材料有关的参数.

Gruneisen 状态方程表达式为

$$p=\frac{\rho_0C_0^2\mu\left[1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{a}{2}\mu^2\right]}{\left[1-(S_1-1)\mu-S_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\frac{\mu^3}{(\mu+1)^2}\right]^2}+(\gamma_0+a\mu)E\tag{17}$$

式中: $\mu=\rho/\rho_0-1$; C_0 和 S 分别为 u_s-u_p 直线的截距和斜率; γ_0 为 Gruneisen 系数; a 为 γ_0 的体积修正系数;其他为与材料相关的参数,具体见表 2.

表 1 炸药材料参数

Tab. 1 Material parameters of the explosives

	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho/10^{11}\text{ Pa}$	$D/(\text{cm}\cdot\mu\text{s}^{-1})$	$A/10^{11}\text{ Pa}$	$B/10^{11}\text{ Pa}$	R_1	R_2	ω	$e_0/10^{11}\text{ Pa}$
导爆索	1.260	0.210	0.654	5.731	0.201 6	6.000	1.800	0.280	0.090
铵油炸药	0.931	0.052	0.416	0.495	0.019 0	3.907	1.118	0.333	0.090

表 2 铅柱材料参数

Tab. 2 Material parameters of lead cylinder

$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$E/10^{11}\text{ Pa}$	$A/10^{11}\text{ Pa}$	$B/10^{11}\text{ Pa}$	n	C	m	T_m/K
11.35	0.07	0.002 65	0.004 26	0.34	0.205 1	1	625
T_r/K	γ_0	C_0	S_1	S_2	S_3		
298	2.77	3.772	0.785	0	0		

2.3 试验结果分析

从爆轰波传播及物质点压力云图(图 2)可以看出,导爆索在 0.002 μs 时被引爆;0.008 μs 时,导爆索物质点开始飞散,炸药达到稳定爆轰压力 2.40 GPa;直至 0.012 μs 时,平面爆轰波发生碰撞,垂直爆轰波传达至钢板面上.此时,碰撞处爆轰压力达到最大值 4.09 GPa,随后,汇聚后爆轰波沿着未燃烧炸药的方向继续向钢板传播,发生爆轰的物质点则携带着相关的物质参数往外飞散.

从铅柱物质点应力云图(图 3)可以看出,应力从对称导爆索的内侧传播至铅柱上表面,随后以应力波的形式往四周传播,并在表面中心发生

碰撞,类似于炸药的爆轰波碰撞过程.当最大应力达到铅柱的屈服强度时,物质点开始顺着应力的方向往前移动.同时,上层炸药爆轰产生的应力则继续往下传播,这样就形成了一个垂直和水平运动的合应力 σ (图 4),该应力最终导致铅柱压缩.当水平应力达不到铅的屈服强度时,只有垂直应力使铅柱产生压缩,而没有向四周扩散.在 0.166 μs 时,铅柱中心应力已不足以使铅柱产生压缩,而此时对应于导爆索起爆点处的应力却以高应力状态继续向下传播,直到距离铅柱底部 5 mm 处才得以停止.

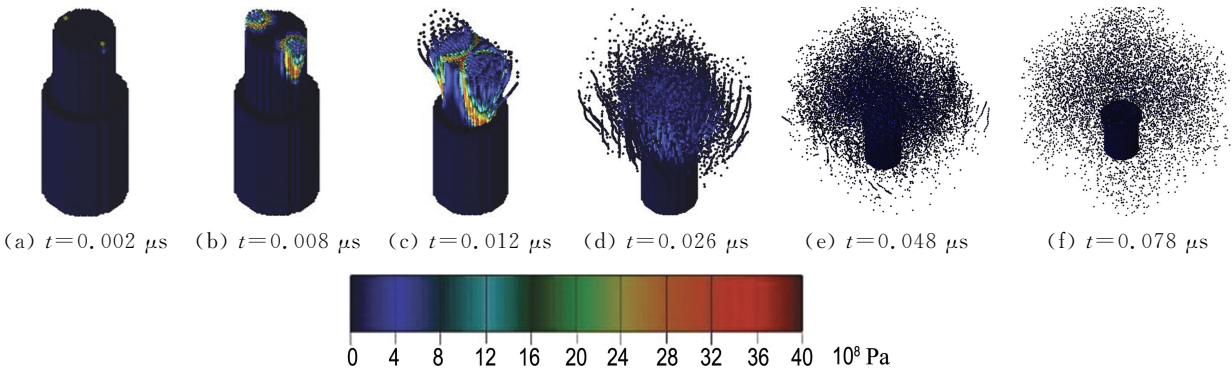


图 2 爆轰波传播及物质点压力云图

Fig. 2 Detonation wave propagation and material point pressure contours

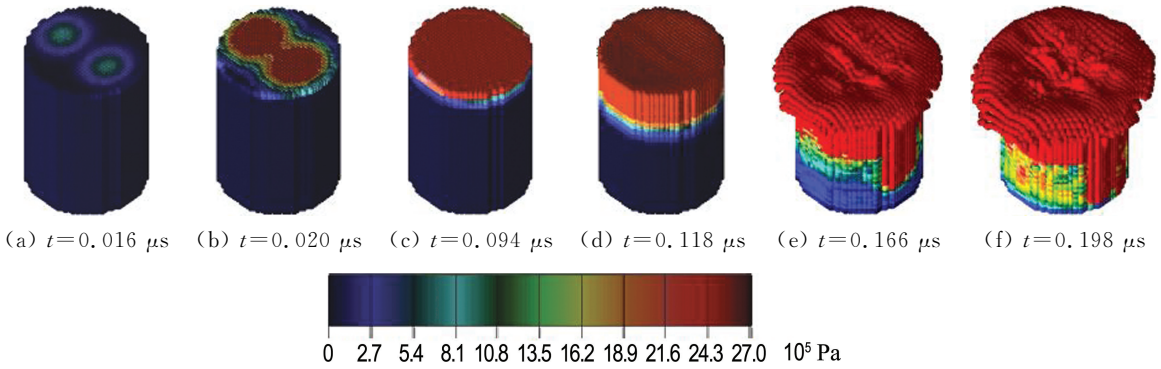


图 3 铅柱物质点应力云图

Fig. 3 Contours of material point stress of lead cylinder

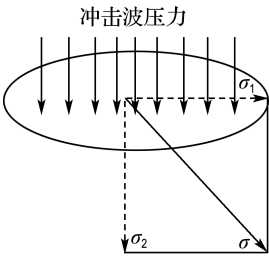


图 4 物质点应力分量图

Fig. 4 Component diagram of material point stress

从冲击波传播及物质点应变云图(图 5)可知,铅柱的压缩主要是由内往外进行的,爆轰波首先通过钢片作用于铅柱中心.在水平应力的作用下,铅柱往四周延展,同时,沿垂直应力的作用往下压缩.在拉伸应力波的作用下,铅柱首先在未扰动区域形成一系列的“拉伸点”.随着冲击波次的增加,“拉伸点”的应变率也逐渐增大,这些“拉伸点”则成为铅柱压缩的主要因素.

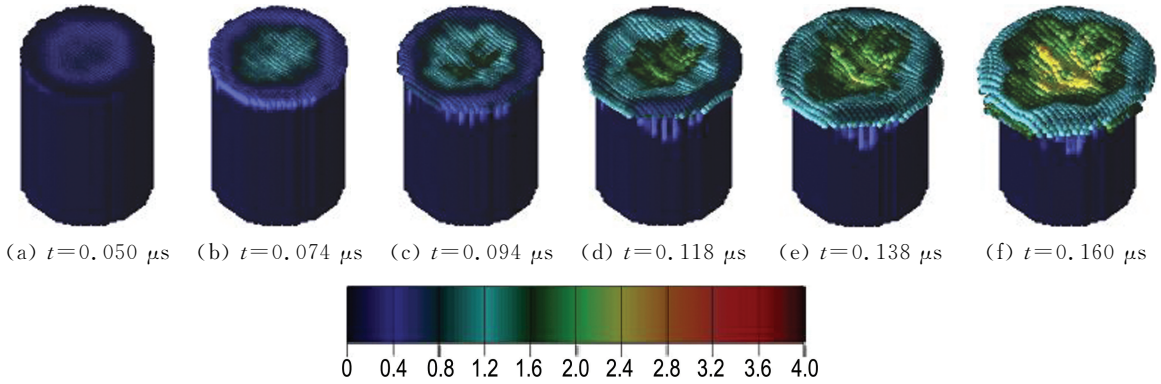


图 5 冲击波传播及物质点应变云图

Fig. 5 Shock waves propagation and material point strain contours

3 炸药猛度试验

猛度是指炸药爆炸时对其接触介质的破坏能力,用爆轰产物作用于垂直爆轰波传播方向上的单位面积冲量(比冲量)来表示.国内外测定炸药猛度的方法主要有铅柱压缩法、铜柱压缩法、猛度摆和平板炸坑试验^[14-16].

在炸药猛度试验中,并不是炸药爆炸的所有能量都作用在与爆轰波传播方向垂直的目标物上,只有一部分作为有效药量使铅柱压缩,另外一部分则往侧向飞散.大量的理论和实践表明,爆轰产物作用于目标物的有效比冲量为

$$i = \frac{8}{27} m_e D \quad (18)$$

式中: m_e 为炸药的有效装药量,kg; D 为炸药的爆速,km/s.

按照标准试验设计炸药猛度试验,测试示意图如图6所示.在硝酸铵类炸药两侧对称布置导爆索.

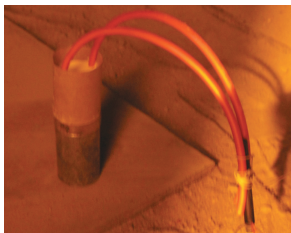


图6 炸药猛度测试示意图

Fig. 6 The schematic diagram of explosive brisance test

试验与数值计算结果如图7所示.数值计算的铅柱压缩高度为11.49 mm,现场试验实测的压缩值为11.51 mm,误差仅为0.17%.两者的铅柱上表面直径均为75.2 mm.模拟爆破后的铅柱中心存在一个高应变区域,实测的铅柱也有一个往外发散的高应变区域.结果表明数值计算的结果与试验结果基本上是一致的.

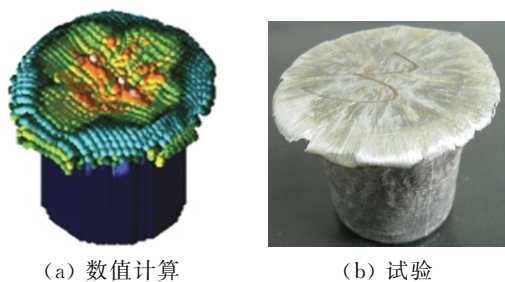


图7 试验与数值计算结果对比

Fig. 7 Contrast of numerical calculation and experimental results

4 结 论

(1)应用物质点法可有效避免有限元法在求解超音速、超高压问题过程中的网格大变形导致的求解失败问题,该方法可有效追踪到爆轰波、冲击波传播与碰撞的物质界面.

(2)爆轰波碰撞能够达到聚能效应,碰撞后的爆轰波压力相比稳定爆轰波有了很大的提高,炸药猛度试验中,由拉伸应力波形成的一系列“拉伸点”在铅柱的压缩过程中起着主导作用.

(3)物质点法在模拟爆轰波碰撞炸药猛度试验时具有较高的准确度,可进一步将该方法推广到其他炸药猛度测试或爆轰问题中,为炸药理论和数值分析提供一种新的方法.

参考文献:

- [1] SULSKY D, CHEN Z, SCHREYER H L. A particle method for history-dependent materials [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1994, **118**(1/2):179-196.
- [2] 陈卫东,杨文森. 高能炸药爆轰过程的广义插值物质点法模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, **33**(9):1110-1115.
CHEN Weidong, YANG Wenmiao. Explosion simulation of high explosive materials using the generalized interpolation material point (GIMP) method [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2012, **33**(9):1110-1115. (in Chinese)
- [3] 王宇新. 爆炸冲击动力学数值分析物质点法[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014.
WANG Yuxin. *Numerical Analysis on Explosion and Impact Dynamics by Material Point Method* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [4] ZHANG D Z, MA X, GIGUERE P T. Material point method enhanced by modified gradient of shape function [J]. *Journal of Computational Physics*, 2011, **230**(16):6379-6398.
- [5] SULSKY D, ZHOU Shijian, SCHREYER H L. Application of a particle-in-cell method to solid mechanics [J]. *Computer Physics Communications*, 1995, **87**(1/2):236-252.
- [6] 陈卫东,杨文森,严 涵,等. 球对称形式物质点法及其在水下爆炸中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2013, **33**(5):494-500.
CHEN Weidong, YANG Wenmiao, YAN Han, et al. Spherically-symmetric form of the material point method with applications to underwater explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, **33**(5):494-500. (in Chinese)
- [7] 马 上,张 雄,邱信明. 超高速碰撞问题的三维物

- 质点法[J]. 爆炸与冲击, 2006, **26**(3):273-278.
- MA Shang, ZHANG Xiong, QIU Xinming. Three-dimensional material point method for hypervelocity impact [J]. **Explosion and Shock Waves**, 2006, **26**(3):273-278. (in Chinese)
- [8] 张 雄, 廉艳平, 刘 岩, 等. 物质点法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- ZHANG Xiong, LIAN Yanping, LIU Yan, *et al.* **Material Point Method** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)
- [9] 张 帆. 物质点法在冲击动力学中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- ZHANG Fan. Study and applications of material point method in impact dynamics [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [10] 陈卫东, 杨文森, 张 帆. 基于物质点法的水下爆炸冲击波数值模拟[J]. 高压物理学报, 2013, **27**(6): 813-820.
- CHEN Weidong, YANG Wenmiao, ZHANG Fan. Material point method for numerical simulation of underwater explosion blast wave [J]. **Chinese Journal of High Pressure Physics**, 2013, **27**(6):813-820. (in Chinese)
- [11] 王宇新, 李晓杰, 闫鸿浩, 等. 爆轰波碰撞聚能无网格 MPM 法数值模拟[J]. 计算力学学报, 2014, **31**(2):223-227.
- WANG Yuxin, LI Xiaojie, YAN Honghao, *et al.* Simulation on assembling energy of detonation wave by using MPM [J]. **Chinese Journal of Computational Mechanics**, 2014, **31**(2): 223-227. (in Chinese)
- [12] 周 旭, 张 雄. 物质点法数值仿真(软件)系统及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- ZHOU Xu, ZHANG Xiong. **Material Point Method Simulation System** [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [13] YORK A R, SULSKY D, SCHREYER H L. Fluid-membrane interaction based on the material point method [J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2000, **48**(6): 901-904.
- [14] 徐秀焕, 彭年均, 谢云峰. 无梯粉状硝铵炸药装药密度对猛度的影响[J]. 煤矿爆破, 2007, **76**(1):1-3.
- XU Xiuhuan, PENG Nianjun, XIE Yunfeng. Influence of charge density of powdery non-TNT ammonium nitrate explosive on brisance [J]. **Coal Mine Blasting**, 2007, **76**(1):1-3. (in Chinese)
- [15] 李玉平, 刘玉存, 于雁武. 烟火药猛度测试研究[J]. 工业安全与环保, 2011, **37**(11):19-20.
- LI Yuping, LIU Yucun, YU Yanwu. Study on brisance test of pyrotechnics [J]. **Industrial Safety and Environmental Protection**, 2011, **37**(11):19-20. (in Chinese)
- [16] 国家技术监督局. 炸药猛度试验 铅柱压缩法: GB 12440—90[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
- State Bureau of Technical Supervision. Explosive-Determination of Brisance-Lead Cylinder Compression Test: GB 12440-90 [S]. Beijing: China Standards Press, 1990. (in Chinese)

Application of material point method to explosive brisance tests with detonation wave collision

MIAO Yusong^{1,2}, LI Xiaojie^{*1,2}, WANG Yuxin^{1,2}, YAN Honghao^{1,2}, WANG Xiaohong^{1,2}

(1. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Due to the large-scale grid distortion, it always leads to low precision, even making solution fail when using the conventional finite element method to simulate the detonation process. The material point method (MPM), which combines the advantages of Lagrange method and Euler method, is applied to simulate the detonation wave collision in explosive brisance tests. The detonation wave collision is reproduced, and the stress and strain distributions in lead cylinder are obtained. Compared with the experimental results, the compression error of lead cylinder is only 0.17%, which verifies the good accuracy of the material point method used in explosive brisance tests. It provides a new approach for the research of detonation propagation and collision process as well as explosive brisance tests.

Key words: material point method; detonation wave collision; explosive brisance; lead cylinder compression test