

文章编号: 1006-9941(2016)07-0651-06

PBX 压制过程中细观力学行为的二维数值模拟

唐红¹, 周俊辉¹, 吕珂臻², 陈学平², 豆育升¹

(1. 重庆邮电大学计算机科学与技术学院, 重庆 400065; 2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 应用圆形近似, 建立了炸药颗粒随机分布的细观力学模型。进行了基于物质点法的奥克托今 (HMX) 基高聚物粘结炸药 (PBX) 炸药压制过程中力学行为的数值模拟。重点分析了压制过程中体系的应力和温度的变化以及晶体颗粒的变形。模拟结果表明, 压制过程可以分为整合和巩固两个阶段。在整合阶段, 颗粒受到压力而重新排列, 应力产生于颗粒与压缩面的接触部分, 并形成了多条的应力链。应力链沿炸药颗粒间的接触面向上和向下传播, 体系在受力的过程中温度逐渐升高, 体系局部最大温升为 10 K。体系进入巩固阶段的塑性形变过程后, 内部应力梯度减小, 同时体系内部明显存在温差, 最大温差为 20 K。

关键词: 炸药压制; 细观力学行为; 物质点法; 高聚物粘结炸药 (PBX)

中图分类号: TJ55; TP319

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.07.005

1 引言

高聚物粘结炸药 (Polymer Bonded Explosive, PBX), 在压制过程中会发生位移、变形甚至断裂等各种力学行为, 但是这些力学行为很难直接观察到, 故人们难以明确其成型机理。为表征复合含能材料的压制成型特性, 许多学者通过数值模拟方法^[1-3] 计算炸药不同组分中力学参数的变化, 得到压制过程的力学行为状态及模拟数据, 对改进压制工艺和控制炸药质量具有重要意义。

PBX 的力学性能、热力学性能和化学性质都与细观尺度上的物理和化学过程直接相关^[4], 因此在细观尺度上研究 PBX 的压制过程对于理解它的力学性能有重大意义。目前, 工程上常用的研究 PBX 力学行为的 Lagrangian 有限元方法 (Finite Element Method, FEM) 是基于连续介质的力学方法^[5]。如兰琼等^[2] 利用有限元计算方法, 对奥克托今 (HMX) 基 PBX 炸药温压时效处理过程的加热加压阶段进行模拟, 得到处理过程中炸药件尺寸变化规律, 并推导出炸药件密度变化量, 由此预测温压时效处理对 PBX 的作用效果;

张涛等^[6] 运用基于有限元方法对 PBX 粉末温压成型过程进行了数值模拟, 获得了粉末体几何形变、应力场及相对密度分布等相关数据等。有限元方法的优点是计算速度快, 能够在接近于工程的宏观尺度上对材料的性质进行研究, 缺点是不能有效地在计算中考虑微观结构的性质, 且在处理材料极大变形问题时, 网格发生扭曲、畸变和缠绕, 重新划分网格非常困难, 计算精度严重下降。近些年来, 无网格法被提出并成为研究热点, 常用的无网格法有十几种, 其基本思想是将连续体离散为质点单元的形式, 在计算过程中, 所有信息都由这些质点来表达, 避免了网格重新划分的难题。作为无网格法之一, 物质点法 (Material Point Method, MPM) 本质上是一个基于粒子的计算方法^[7], 相对其他基于网格的数值方法具有更高的效率和精度, 同时在处理大变形问题以及一些带有接触的问题时比有限元法具有显著的优势^[8]。

因此, 本研究主要应用 MPM 方法模拟细观尺度下 HMX 基 PBX 压制成型过程的力学行为, 重点分析 HMX 基 PBX 压制成型过程中炸药颗粒变形、颗粒间的应力传递以及温度变化等细观力学行为。

2 MPM 的基本理论

物质点法在计算时满足质量守恒方程和动量守恒方程^[7]:

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

收稿日期: 2015-11-23; 修回日期: 2016-01-07

基金项目: 国家自然科学基金资助 (U1330138 和 21203259)

作者简介: 唐红 (1957-), 女, 教授, 主要从事为网络计算、科学与工程计算、网络测量研究。e-mail: tanghong@cqupt.edu.cn

通信联系人: 豆育升 (1953-), 男, 教授, 主要从事计算机化学、高性能计算等研究。e-mail: douys@cqupt.edu.cn

$$\rho a = \nabla \cdot \sigma + \rho b \quad (2)$$

式中, ρ 为材料密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; a 是加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; v 是质点速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; b 是单位体积力, N ; σ 是柯西应力张量, Pa 。

将基于背景网络的有限元形函数, 试函数 ω 带入动量守恒方程(3)并在区域 Ω 上积分, 可以得到动量方程的虚功方程^[7]:

$$\int_{\Omega} \rho a \cdot \omega dV + \int_{\Omega} \rho \sigma^s : \nabla \omega dV - \int_{\Omega} \rho b \cdot \omega dV - \int_{\Gamma} \tau \cdot \omega dS = 0 \quad (3)$$

式中, dV 和 dS 分别表示微分体积元和面积元; σ^s 是比应力 $\sigma^s = \sigma / \rho$; Γ 为指定的应力边界; 边界应力为 τ ; 在指定位移边界上的试函数 $\omega = 0$ 。

由于把连续体离散成具有集中质量的物质点, 在整个计算过程中每个物质点的质量保持不变, 故自动满足质量守恒方程。因此, 密度可以表示为^[7]:

$$\rho(x, t) = \sum_{p=1}^{N_p} m_p \delta(x - x_p) \quad (4)$$

式中, m_p 是物质点 p 的质量, g ; δ 是狄拉克函数; x_p 是物质点 p 的坐标; N_p 是物质点总数。

物质点数量和质量在整个计算过程中始终不变, 质量守恒方程自动满足。在求解动量方程时, 质点和背景完全固连, 随着背景网格一起运动, 因此可通过建立在背景网格节点上的有限元形函数 $N_i(x)$ 实现物质点和背景网格节之间信息的映射。网格节点和物质点这件变量的映射关系为^[9]:

$$\psi_p = \sum_{i=1}^{n_u} \psi_i N_i(x_p) \quad (5)$$

式中, ψ_p 表示物质点携带的变量; ψ_i 表示网格节点上的变量; n_u 表示单元节点数; x_p 表示物质点的坐标。

最终(3)式可写成下面的节点离散形式:

$$m_i a_i = f_i^{\text{int}} + f_i^{\text{ext}} \quad (6)$$

式中节点质量为:

$$m_i = \sum_{p=1}^{N_p} m_p N_i(x_p) \quad (7)$$

内力:

$$f_i^{\text{int}} = - \sum_{p=1}^{N_p} m_p \sigma_p^s : \nabla N_i|_{x_p} \quad (8)$$

外力:

$$f_i^{\text{ext}} = \sum_{p=1}^{N_p} m_p b N_i(x_p) + \int_{\Gamma} N_i(x_p) t d\Gamma \quad (9)$$

(6)式为动量方程在网格节点上的离散形式, 这里采用显式积分进行求解, 具体步骤可以参考文献[7,9]。

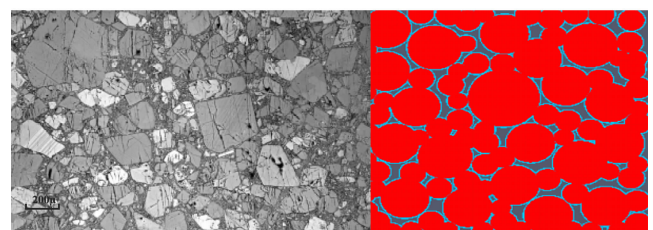
物质点法实现了物质点到网格和网格到物质点的

2次映射, 物质点的应力可利用本构方程由式(5)和材料方程更新, 得到下一时刻物质点所携带的变量。物质点法的背景网格只在每个时间步内和物体固连, 在每个时间步结束时, 丢弃已经变形的背景网格, 这样避免了传统的有限元法中背景网格固定不动, 造成网格的畸变和缠结。

3 PBX 压制数值模拟

3.1 PBX 细观结构模型

图1a为HMX基PBX炸药在细观结构显微镜照片^[10], 图1a中显示PBX炸药颗粒的等效直径最大为0.2 mm, 粘结剂厚度约为0.01 ~ 0.05 mm。其中HMX颗粒大小、形状各不相同, 分布也极其不规则, HMX颗粒之间还存在粘结剂。在如此复杂的PBX炸药细观结构条件下, 建立一种直接反应炸药细观结构的模型存在一定的难度。PBX炸药是由炸药颗粒和粘结剂按一定的比例混合压制成型的, 在细观计算模型的构建中需要把PBX炸药压制成型过程考虑进去。



a. microstructure of PBX explosives b. distribution of explosive particle

图1 PBX炸药细观结构显微镜照片和炸药颗粒分布

Fig. 1 Micrographs of the microstructure of PBX explosives and the distribution of explosive particles

再利用图像处理技术, 将文献[10]中细观结构显微镜照片(图1a)构建成较合理的PBX炸药细观结构模型(图1b)。在细观结构计算模型的构建中, 将杂乱的晶体颗粒近似成圆形, 同时用粘结剂对颗粒外表层进行包裹。在圆形近似的过程中, 密集的粒径分布也被近似成稀疏的分布。这样的抽象近似对实际力学性能的影响还需进一步研究。

3.2 计算模型及方法

由PBX炸药颗粒分布模型图(图1b), 设计基于物质点法计算模型图, 如图2所示。模型由刚性压头、刚性模具、炸药颗粒HMX和粘接剂Estane组成。压头的压制面设为刚性加压力面, 模具内壁设为刚性约束面。红色的圆形粒子代表炸药颗粒, 炸药颗粒外表覆

盖的一层蓝色物质为 Estane 粘结剂。炸药颗粒之间存在着少许孔隙,孔隙中为空物质。模型中共有 90 个直径范围为 0.02 ~0.2 mm 的炸药颗粒,颗粒之间紧密排布,外层为厚度为 0.005 ~0.010 mm 的 Estane 粘结剂,HMX 的体积分数为 85%,粘结剂体积分数为 6%,其余体积为孔隙。模型中,刚性压头以 0.3 m · s⁻¹ 的速度向下压缩炸药,炸药和周围环境的初始温度均为 353.15 K,模拟时间设为 1 ms。

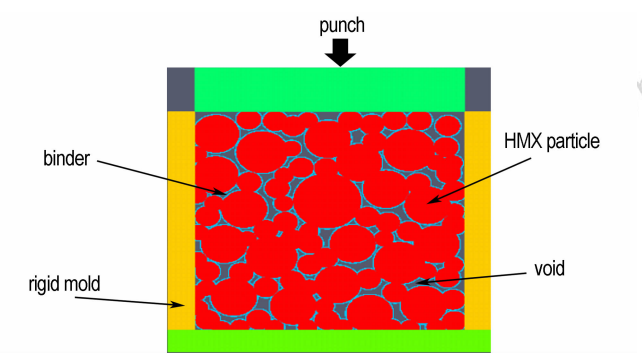


图 2 计算模型图
Fig.2 Calculation model

模型中 HMX 颗粒采用弹塑性材料模型和 Grüneisen 状态方程描述。压头和模具材料为刚性。弹塑性材料模型的应力表示为^[11]:

$$\sigma=[1+(\varepsilon/C)1/P](\sigma_0+\beta E_p \varepsilon_p^{\text{eff}}) \tag{10}$$

式中,σ 为应力,MPa; σ₀ 为初始屈服应力,MPa; ε 是应变率,C 和 P 是 Cowper-Symond 应变率参数,ε_p^{eff} 是有效塑性应变,E_p 是塑性硬化模量,β 是硬化参数。Grüneisen 方程为^[11]:

$$\rho=\frac{\rho^2\mu[1+(1-\gamma_0/2)\mu-\alpha\mu^2/2]}{[1-(s_1-1)\mu-s_2\mu^2/(\mu+1)-s_3\mu^3/(\mu+1)^2]^+}+(\gamma_0+\alpha\mu)E \tag{11}$$

式中,p 为压力,MPa; μ=ρ/ρ₀-1=1/V_r-1; c 代表常温常压无扰动状态声速,m · s⁻¹; ρ₀ 为初始密度,kg · m⁻³; V_r为相对体积,m³; γ₀ 为 Grüneisen 常数; E 为内能,J; s₁、s₂和 s₃ 为冲击波波速-波后粒子速度曲线的斜率系数; α 为一阶体积修正因数。HMX 颗粒材料模型参数见表 1^[12]。

表 1 HMX 材料模型参数

Table 1 The model parameters of HMX

density /g · cm ⁻³	shear modulus G/GPa	Poisson's ratio	yield stress /MPa	specific heat capacity /J · kg ⁻¹ · K ⁻¹	thermal conductivity /W · K ⁻¹ · m ⁻¹
1.90	2.70	0.32	100	1150	0.25

模型中粘结剂为 Estane,采用 Prony 级数形式的粘弹性本构模型和 Tait 状态方程 ,Prony 级数形式粘弹性模型的应力表示为^[13]:

$$\sigma=\int_0^t 2G(t-\tau)\frac{de}{d\tau}d\tau+I\int_0^t K(t-\tau)\frac{d\Delta}{d\tau}d\tau \tag{12}$$

式中,σ 为应力,MPa; G(t) 为剪切松弛核函数,e 为应变偏量部分(剪切变形),Δ 为应变体积部分(体积变形),t 为当前时间,s; τ 为过去时间,s; I 为单位张量。用 Prony 级数表示粘弹性属性的基本形式为^[11]:

$$G(t)=G_\infty+\sum_{i=1}^{n_G}G_i\exp\left(-\frac{t}{\tau_i^G}\right) \tag{13}$$

$$K(t)=K_\infty+\sum_{i=1}^{n_K}K_i\exp\left(-\frac{t}{\tau_i^K}\right) \tag{14}$$

式中,G_∞和 G_i是剪切模量,MPa; K_∞和 K_i是体积模量,MPa; τ_i^G和 τ_i^K是各 Prony 级数分量的松弛时间(Relative time),s。Tait 状态方程为^[13]:

$$V(p,T)=V(0,T)[1-\text{Cln}(1+\frac{p}{B(T)})] \tag{15}$$

$$B(T)=CK(0,T) \tag{16}$$

式中,p 为压力,MPa; T 为温度,K; C=0.0894 是通用的 Tait 常数; V(0,T) 是在 0 压下由温度决定的体积函数; K(0,T) 是在 0 压下温度决定的体积模量函数。粘接剂 Estane 材料模型参数见表 2^[12]。

表 2 Estane 材料模型参数

Table 2 The model parameters of Estane

bulk modulus /GPa	shear modulus /GPa	density /g · cm ⁻³	specific heat capacity /J · kg ⁻¹ · K ⁻¹	thermal conductivity /W · K ⁻¹ · m ⁻¹
3.6	0.27	1.10	1150	0.25

4 模拟结果及分析

4.1 PBX 压制过程中的变形

刚性压头以 0.3 m · s⁻¹ 的速度从上往下压缩时,PBX 炸药体系在不同时刻的变形情况如图 3 所示。数值模拟结果表明,PBX 在压缩的过程中,其颗粒形状是不断变化的。图 3a 和图 3b 为压缩过程中的整合阶段,炸药颗粒重新排列,形成接触挤压。在图 3a 中,位于接触面的炸药颗粒首先受到刚性压头的挤压,炸药颗粒向下的运动,颗粒间的缝隙不断减小。在 0.50 ms 时,炸药颗粒已趋于压实的状态,各颗粒之间接触挤压已经基本形成。图 3c 和图 3d 表示炸药颗粒的巩固

阶段发生塑性形变的过程。在图 3c 中炸药体系压缩到 0.75 ms 时, 炸药颗粒之间均受到不同程度力的挤压, 发生塑性变形, 颗粒轮廓明显改变。一直压缩到图 3d 的塑性变形的状态。炸药颗粒的特征基本消失, 形成密实整体, 压制过程变为对炸药整体的压缩作用。

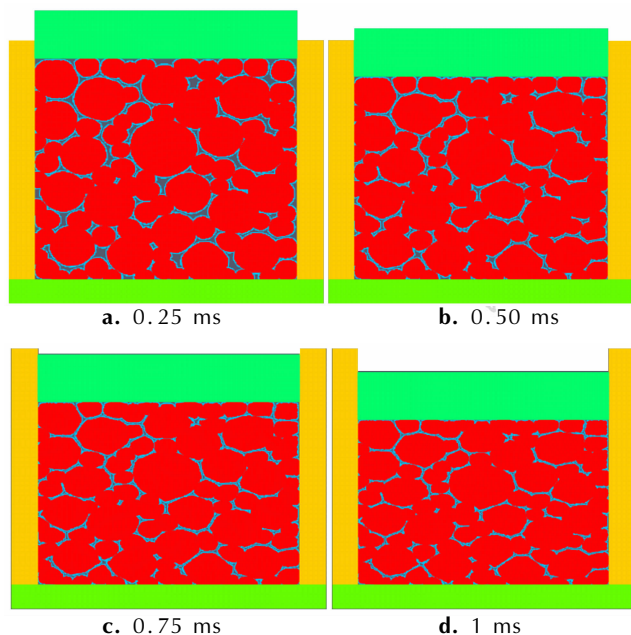


图 3 PBX 炸药压制过程中不同时刻的变形模拟结果

Fig. 3 Deformation simulation results of PBX at different times during compression

4.2 PBX 压制过程中的应力变化

图 4 为 PBX 炸药压制过程中不同时刻应力分布模拟结果。从图 4a 和图 4b 看出, 在 0.25 ms 时, 应力沿炸药颗粒间的接触面向刚性模具底板传播, 并形成了多条的应力链。同一个 PBX 炸药内部应力分布不均匀, 炸药体系顶部处于高应力状态, 底部部分应力较小。应力集中点主要集中在颗粒与刚性压头的接触部分, PBX 炸药内部存在应力梯度, 各炸药颗粒之间应力差较大。图 4c 和图 4d 可以看出炸药体系应力梯度在减小, 这是由于大部分炸药颗粒已发生滑移和变形, 并且处于塑性变形状态。在压缩至 1 ms 时, 炸药体系已基本处于密实状态, 但各部分应力分布仍然呈不均匀状态。由于在炸药压制成型过程中, 炸药颗粒间所受的压力和摩擦力略大于其他部位, 而导致应力在颗粒接触面较大。从图 4 可以看出, 早期阶段炸药体系呈现出一个比较松散的状态, 在不断压缩过程中, 各颗粒之间受到压力开始接触挤压而导致应力变化。这与刘群^[14]等利用非线性有限元计算方法模拟 JO-9159 炸药颗粒压制成型过程得到的结果“应力集

中主要出现在药粒与约束面的接触部分; 当药粒之间空隙被填满, 药粒进入塑性变形后, 药粒内部压力迅速升高且压力趋于一致”类似。

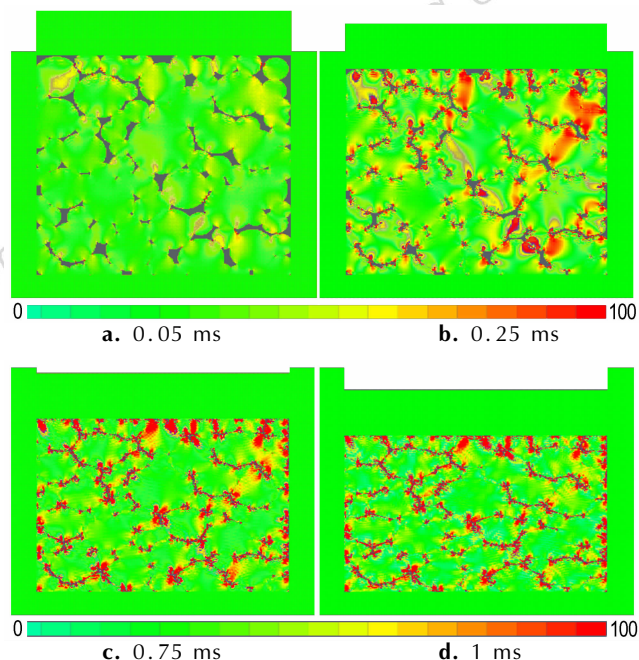


图 4 PBX 炸药压制过程中不同时刻应力分布模拟结果

Fig. 4 Stress distribution simulation results of PBX at different times during compression

图 5 为模拟压制过程中 PBX 炸药体系整体应力-应变率曲线。图 5 表明, 在压缩初始阶段, 应力上升速度较快, 应力和应变呈线性关系, PBX 材料表现为弹性性质。超过材料的屈服力后, 受到粘结剂性质影响, PBX 材料开始表现为粘性性质, 应力上升速度减缓。上述结论与蔡宣明^[15]等关于动态力学响应及细观损伤破坏模式的研究结果“弹性阶段, 应力-应变曲线开始阶段具有较好的线性关系; 屈服阶段, 随着应变的增加, 应力开始减小; 紧接着进入强化阶段, PBX 模拟材料抗压能力又开始增强, 应力随着应变的增大而增大”相符。

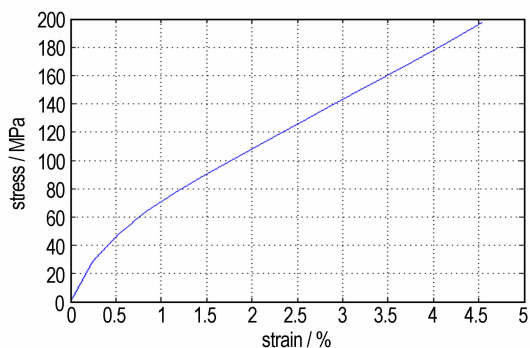


图 5 PBX 炸药体系压缩的应力-应变率曲线

Fig. 5 Compressive stress-strain rate curve for PBX system

4.3 PBX 压制过程中的温度变化

图 6 为 PBX 炸药体系内不同时刻温度分布模拟结果。图 6 显示,炸药体系受压后,刚性压头与 PBX 炸药体系接触面温度首先升高,随着压制的进行,炸药内部温度逐渐升高,而达到平衡后,炸药内部存在温差。从图 6a 和图 6b 看出,炸药体系在 0.10 ms 时,炸药体系顶部在刚性压头挤压和颗粒间摩擦的作用下温度逐渐升高;0.25 ms 时,体系内部的局部温度最大上升了 10 K。炸药体系底部由于受到压力影响较小,温度明显低于顶部。图 6c 和图 6d 可以看出温度变化已经趋于平衡,表明体系内部温差逐渐减小。在 1 ms 时,炸药体系已接近密实状态,除中心处附近温度较高以外,其余颗粒温度基本相同,体系内部最大温差在 20 K 左右。图 7 为模拟过程中,炸药体系整体温

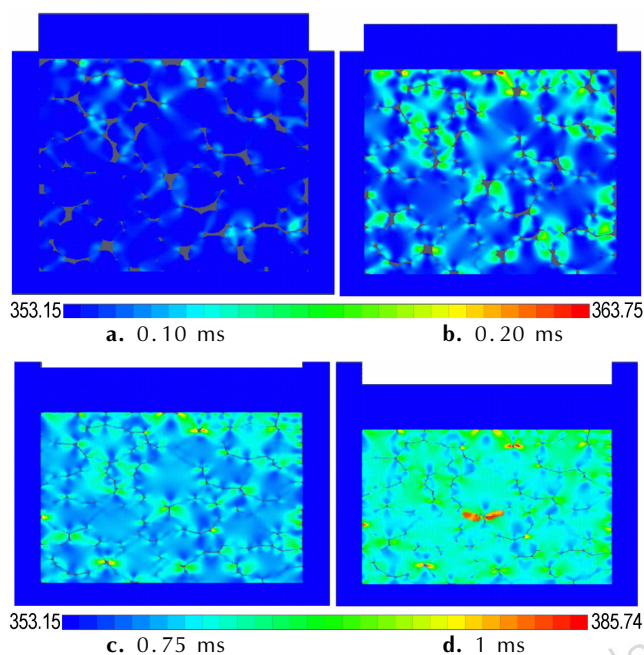


图 6 PBX 炸药压制过程中不同时刻温度分布模拟结果

Fig. 6 Temperature distribution simulation results of PBX at different times during compression

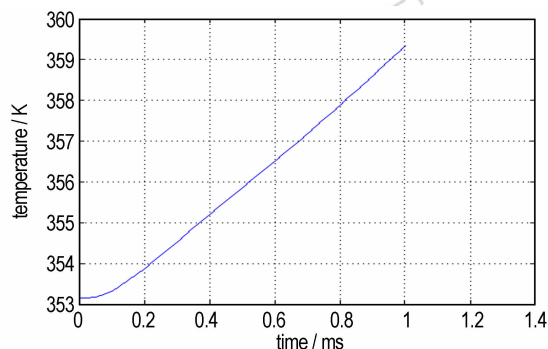


图 7 PBX 炸药体系压缩的温度时间变化曲线

Fig. 7 Compressive temperature-time curve for PBX system

度变化曲线。从图 6、图 7 得出,模拟结束时,体系整体温度上升到了 359.12 K,局部最高温度为 385.74 K。温度变化的模拟结果与文献[16]的结果“PBX 炸药在升压过程中均出现内部温度瞬时增高的现象,达到平衡后,炸药内部存在温差,药柱中心处药粒温度最高的结果,压药柱内部最大温升为 29 K”基本一致。

5 结 论

采用物质点法,对 HMX 基 PBX 炸药压制过程中的力学行为进行了细观尺度的模拟。在模拟压缩过程中,刚性压头以 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度从上往下压缩,模拟时间持续 1 ms。模拟结果表明,PBX 在压缩的过程中,位于接触面的炸药颗粒首先受到刚性压头的挤压,炸药颗粒向下的运动,颗粒间的缝隙不断减小;在 0.50 ms 时,炸药颗粒已趋于压实的状态;在 0.75 ms 时,炸药颗粒之间均受到不同程度力的挤压,发生塑性变形,颗粒轮廓明显改变;至 1 ms 时 PBX 无显著的颗粒特征,形成密实整体。

结果表明,压缩中炸药颗粒存在整合和巩固两个阶段。在整合阶段(即 $0 \sim 0.5 \text{ ms}$),PBX 颗粒受到压力而重新排列,应力和温度集中主要出现在炸药颗粒与压缩面的接触部分,并形成了多条应力链。应力链沿炸药颗粒间的接触面向上和向下传播。炸药体系顶部应力、温度变化均大于底部部分;当炸药颗粒之间空隙被填满,炸药体系进入巩固阶段(即 $0.5 \sim 1 \text{ ms}$)。该阶段发生塑性形变,炸药体系内部炸药体系应力梯度在减小,炸药颗粒间所受的压力和摩擦力略大于其他部位,而导致应力在颗粒接触面较大;在压制过程中,炸药体系温度升高,局部温度最大上升了 10 K。最后,炸药体系达到平衡,内部存在温差,体系内部最大温差在 20 K 左右。除中心处附近温度较高以外,其余颗粒温度基本相同。

本研究中的计算模型和模拟方法同样适用于其他组成的 PBX 炸药,在对其它组分的 PBX 炸药进行模拟时,只需要输入其相关的物理、化学性质参数。由于计算程序的限制,本研究中只对 HMX 基 PBX 压制过程进行了二维下的数值模拟,下一步工作是建立 HMX 基 PBX 炸药细观结构的三维计算模型,对炸药压制过程进行三维数值模拟计算。不同压力下、不同颗粒粒径下等多种情况下对应力的传播、变形的影响,以及炸药颗粒的损伤本构模型的研究有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Banerjee B, Cady C M, Adams D O. Micromechanics simulations of glass-epoxy mock polymer bonded explosives[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2003, 11(4): 457.
- [2] 兰琼, 唐维, 贺建华, 等. 某 HMX 基 PBX 温压时效处理过程变形规律数值模拟[J]. 含能材料, 2015, 23(6): 543-547.
LAN Qiong, TANG Wei, HE Jian-hua, et al. Simulation on deformation of HMX based PBX by thermal-pressure treatment[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(6): 543-547.
- [3] Lusti H R, Gusev A A. Finite element predictions for the thermoelastic properties of nanotube reinforced polymers[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2004, 12(3): S107.
- [4] Menikoff R, Shaw M S. Review of the forest fire model for high explosives[J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2008, 12(3): 569-604.
- [5] SaeedMoaveni. Finite element analysis theory and application with ANSYS[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [6] 张涛, 赵北君, 朱世富, 等. PBX 粉末成形的数值模拟研究[J]. 材料工程, 2009, 35(5): 68-72.
ZHANG Tao, ZHAO Bei-jun, ZHU Shi-fu, et al. Numerical simulation study of PBX powder-forming[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2009, 35(5): 68-72.
- [7] 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): 179-196.
- [8] Hornemann U, Holzwarth A. Shaped charge penetration in alumina targets[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 20(1): 375-386.
- [9] Andersen S, Andersen L. Analysis of spatial interpolation in the material-point method[J]. *Computers & Structures*, 2010, 88(7): 506-518.
- [10] Peterson J R, Wight C A, Berzins M. Applying high-performance computing to petascale explosive simulations[J]. *Procedia Computer Science*, 2013, 18: 2259-2268.
- [11] 王晨, 陈朗, 刘群, 等. 多组分 PBX 炸药微观结构冲击点火数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(2): 167-173.
WANG Chen, CHEN Lang, LIU Qun, et al. Numerical simulation for analyzing shock to ignition of PBXs with different compositions in meso-structural level[J]. *Explosion & Shock Waves*, 2014, 34(2): 167-173.
- [12] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 334-340.
DONG Hai-shan, ZHOU Fen-fen. High energy explosives and correlative physical properties[M]. Beijing: Science Press, 1989: 334-340.
- [13] Xue L, Borodin O, Smith G D, et al. Micromechanics simulations of the viscoelastic properties of highly filled composites by the material point method (MPM)[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2006, 14(4): 703.
- [14] 刘群, 陈朗, 鲁建英, 等. 炸药颗粒压制成型数值模拟[J]. 高压物理学报, 2009, 23(6): 421-426.
LIU Qun, CHEN Lang, LU Jian-ying, et al. Numerical simulation of explosive particles compaction[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, 23(6): 421-426.
- [15] 蔡宣明, 张伟, 魏刚, 等. PBX 模拟材料动态力学响应及微观损伤模式[J]. 含能材料, 2014, 22(5): 658-663.
CAI Xuan-ming, ZHANG Wei, WEI Gang, et al. Dynamic mechanics response and mesoscopic damage of a PBX simulant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(5): 658-663.
- [16] 贾宪振, 王晓峰, 陈松, 等. 炸药等静压工艺安全性的数值模拟研究[J]. 兵工自动化, 2014, 33(7): 65-67.
JIA Xian-zhen, WANG Xiao-feng, CHEN Song, et al. Numerical study of safety of explosive isostatic pressing[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2014, 33(7): 65-67.

Two Dimensional Numerical Simulation for Mesoscopic Mechanics Behaviors of PBX in Pressing Processes

TANG Hong¹, ZHOU Jun-hui¹, Lü Ke-zhen², CHEN Xue-ping¹, DOU Yu-sheng¹

(1. College of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999 China)

Abstract: A mesoscopic mechanics model of random distribution of explosive particles was constructed by applying circular approximation. The numerical simulation of mechanical behaviors in a pressing process of HMX based polymer bonded explosive (PBX) based on the material point method was carried out. The change in stress and temperature of the system and the deformation of explosive particles during the pressing process were emphatically examined. Simulation results show that the compression process can be divided into two stages: integration stage and consolidation stage. In the integration step, the explosive particles are subjected to pressure and rearrangement. The stress is produced at the contact part between explosive particles and compression surface, forming several stress trains and then the stress trains is propagated along the contact surface between explosive particles upward and downward. Temperature in the system gradually increases in the stress process. The maximum temperature rise in the locality of the system is 10 K. In the consolidation step, after the plastic deformation process of the system, the internal stress gradient decreases, at the same time, obvious temperature difference in the system is existed, the maximum temperature difference is 20 K.

Key words: explosive pressing; mesoscopic mechanics behaviors; material point method; polymer bonded explosive (PBX)

CLC number: TJ55; TP319

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.07.005