文章编号:1000-5773(2011)06-0493-08

弹粘塑性双球壳塌缩热点反应模型*

温丽晶[1],段卓平[1],张震宇[2],欧卓成[1],黄风雷[1]

(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081;
2.国防科技大学理学院技术物理研究所,湖南长沙 410073)

摘要:基于Kim的弹粘塑性单球壳塌缩模型,考虑PBX炸药中的粘结剂效应,假设炸药和粘结剂均为弹粘塑性材料,建立了弹粘塑性双球壳塌缩热点反应模型,给出了炸药球壳在冲击压力作用下的速度、应变、温度和化学反应速率的时空分布,以及新的热点反应速率理论表达式。把新的热点反应项与Kim的低压下慢反应项和张震宇提出的高压反应速率方程相结合,得到了新的冲击起爆三项式细观反应速率模型。把该模型加入DYNA2D中,模拟了PBX-9501炸药的一维冲击起爆过程,结果表明:该模型除了可以解释炸药颗粒度和孔隙度的影响外,还可以较好地描述粘结剂强度和含量对PBX炸药冲击起爆感度的影响。

关键词:冲击起爆;反应速率模型;热点点火模型;PBX炸药;粘结剂
中图分类号:O381 **文献标识码**:A

1 引 言

研究炸药的起爆机理和反应过程对提高其起爆性能和安全性能有重要意义,建立可以描述非均质高能炸药冲击起爆过程的反应速率模型,是现代爆轰理论的重要课题。

在过去的几十年中,国内外研究者建立了很多宏观经验的反应速率模型[1-6],这些模型可以较好地再现炸药冲击起爆过程的大部分主要特征,但是它们都没有考虑热点形成的机制,也不能解释炸药的细观结构对冲击起爆过程的影响。非均质炸药的冲击起爆阈值明显低于均质炸药,这主要是由于非均质炸药受到冲击波压缩时多种物理机制[7]的共同作用,在炸药局部产生热点,成为反应的起源。因此,目前非均质炸药冲击起爆反应速率模型的主要发展趋势是建立基于热点形成机制的细观反应速率模型。

Kim等人考虑炸药的细观结构建立了弹粘塑性单球壳塌缩热点反应模型[8],并把它应用于PBX炸药的冲击起爆反应速率模型[9],可以解释炸药的颗粒度和孔隙度等细观结构对冲击起爆过程的影响。但是,如图1所示,在计算球壳的内半径(即炸药孔隙半径)时,孔洞体积取的是粘结剂与孔洞的体积之和,因此,该模型没有考虑PBX炸药中粘结剂的作用,相反把粘结剂算作孔洞,增大了炸药的孔隙率。温丽晶、段卓平等[10]在Kim单球壳模型的基础上,假设粘结剂为刚塑性材料,炸药为弹粘塑性材料,建立了刚塑性粘结剂的双球壳塌缩热点反应模型,解释了粘结剂强度对起爆过程的影响,但是未能描述粘结剂含量的影响。

本研究假设在双球壳模型[10]中炸药和粘结剂均为弹粘塑性材料,建立了弹粘塑性双球壳塌缩热点反应模型,理论计算得到了冲击作用下炸药和粘结剂的温度分布,进而得到热点反应速率的理论表达式。把新得出的热点反应项与Kim的低压下慢反应项[9]和张震宇等建立的高压反应速率方程[11]相结

* **收稿日期**:2010-10-10;**修回日期**:2011-03-28
基金项目:国家自然科学基金重点项目(10832003,11076032)
作者简介:温丽晶(1981—),女,博士研究生,主要从事爆炸与冲击动力学研究. E-mail:wenlj@bit.edu.cn
通讯作者:段卓平(1965—),男,博士,教授,主要从事爆炸与冲击动力学研究. E-mail:duanzp@bit.edu.cn

合,得到了新的冲击起爆三项式细观反应速率模型,把它加入 DYNA2D 中,计算了 PBX-9501 炸药的一维冲击起爆过程,讨论了粘结剂强度和含量对 PBX 炸药冲击起爆感度的影响,验证了该模型的合理性。

2 弹粘塑性双球壳塌缩热点反应模型

采用文献[10]建立的双球壳模型,如图 2 所示。炸药受到冲击压缩时,炸药内孔洞塌缩,塑性变形产生热,形成局部高温,即热点。本研究假设粘结剂和炸药均为弹粘塑性材料,得到弹粘塑性双球壳塌缩热点反应模型。图 2 中,r_o 是球壳的外半径,代表炸药颗粒半径;r_i 是球壳的内半径,代表炸药孔隙半径;r_m 是粘结剂和炸药交界处的半径;σ_r 是径向应力;σ_θ 是切向应力;p_0 是球壳外半径 r_o 处所受的冲击波压力;p_g 是孔洞内的气体压力。

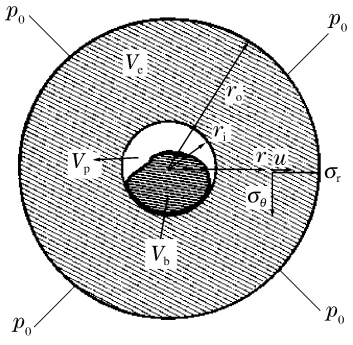


图 1 Kim 的 PBX 炸药单球壳模型[9]

Fig. 1 Single-layered hollow sphere model for PBX from Kim[9]

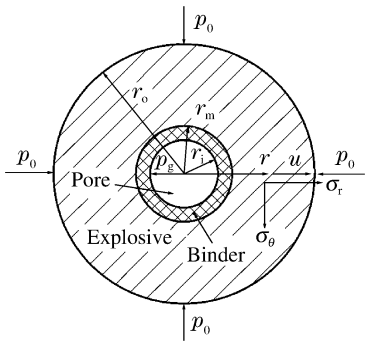


图 2 双球壳模型[10]

Fig. 2 Double-layered hollow sphere model[10]

炸药孔隙度是指炸药中孔隙总体积与炸药总体积的比,也可表示为炸药理论密度和实际装药密度的函数,因此有

$$\alpha_1 = \frac{r_i^3}{r_o^3} = 1 - \frac{\rho}{\rho_T} \tag{1}$$

式中:α_1 是炸药的孔隙度,ρ_T 是炸药的理论密度,ρ 是炸药的初始密度。

对于给定炸药,粘结剂与炸药体积配比固定,可表示为

$$\alpha_2 = \frac{V_b}{V_e} = \frac{r_m^3 - r_i^3}{r_o^3 - r_m^3} \tag{2}$$

式中:α_2 是粘结剂与炸药体积配比,V_b、V_e 分别为粘结剂和炸药的体积。

因此,对于给定炸药,已知其颗粒半径 r_o,可根据(1)式和(2)式求得炸药的孔隙半径 r_i 和粘结剂与炸药交界处的半径 r_m。

2.1 炸药球壳塌缩速度时空分布求解

在常压力和常位移边界条件下,弹粘塑性厚壁球壳的运动过程可以当作准静态问题求解[12]。在冲击压力作用下,弹粘塑性双球壳模型的塌缩过程可以分解为两个球壳的运动,在炸药和粘结剂的交界面上满足界面连续条件。因此,Kim 单球壳塌缩模型的求解结果也适用于双球壳模型中的炸药球壳和粘结剂球壳。

假设在加载压力 p_0 的作用下,炸药和粘结剂交界面处的瞬时径向压力为 p_m,炸药速度为$[v(r_m,t)]_e$,粘结剂速度为$[v(r_m,t)]_b$。从而得到弹粘塑性双球壳塌缩模型的边界条件为

对于炸药球壳

$$\sigma_r(r_i,t) = -p_g H(t) \tag{3}$$

$$[\sigma_r(r_m,t)]_e = -p_m H(t) \tag{4}$$

对于粘结剂球壳

$$[\sigma_r(r_m,t)]_b = -p_m H(t) \tag{5}$$

$$\sigma_r(r_o,t) = -p_0 H(t) \tag{6}$$

连续条件

$$[v(r_m,t)]_b = [v(r_m,t)]_e \tag{7}$$

式中:$H(t)$是阶跃函数。

分别对炸药球壳和粘结剂球壳的塌缩过程进行求解,这里引用 Kim 单球壳塌缩模型的求解结果[8],根据边界条件(3)式、(4)式、(5)式和(6)式直接得出炸药球壳和粘结剂球壳的速度分布瞬态解分别为

$$[v(r,t)]_e = \left[\frac{p_0-p_m}{4G_e(r_o^{-3}-r_m^{-3})r^2}\right]\delta(t) + \frac{\gamma_e}{2(r_o^{-3}-r_m^{-3})r^2k_e}\left[p_0-p_m-2\sqrt{3}k_e\ln\frac{r_o}{r_m}\right] \tag{8}$$

$$[v(r,t)]_b = \left[\frac{p_m-p_g}{4G_b(r_m^{-3}-r_i^{-3})r^2}\right]\delta(t) + \frac{\gamma_b}{2(r_m^{-3}-r_i^{-3})r^2k_b}\left[p_m-p_g-2\sqrt{3}k_b\ln\frac{r_m}{r_i}\right] \tag{9}$$

式中:Delta 函数 $\delta(t)$是 $H(t)$的导数,$t\neq 0$ 时,$\delta(t)=0$。每个方程右边的第一项代表 $t=0$ 时瞬间的弹性剪切变形,第二项代表粘性剪切变形。其中,下标 e 和下标 b 分别代表炸药和粘结剂,$\gamma=\gamma_1\sigma_0$,$k=\sigma_0/\sqrt{3}$,$G=E/3$,γ_1 是常数,σ_0 和 k 分别为静态屈服强度和剪切屈服强度,G 和 E 分别为剪切模量和弹性模量。

当 $t>0$ 时,根据(7)式、(8)式和(9)式可得

$$\frac{\gamma_e}{2(r_o^{-3}-r_m^{-3})r_m^2k_e}\left[p_0-p_m-2\sqrt{3}k_e\ln\frac{r_o}{r_m}\right] = \frac{\gamma_b}{2(r_m^{-3}-r_i^{-3})r_m^2k_b}\left[p_m-p_g-2\sqrt{3}k_b\ln\frac{r_m}{r_i}\right] \tag{10}$$

整理并求解得

$$p_m = \frac{\left(p_0-2\sqrt{3}k_e\ln\frac{r_o}{r_m}\right)(r_m^{-3}-r_i^{-3})\gamma_ek_b + \left(p_g+2\sqrt{3}k_b\ln\frac{r_m}{r_i}\right)(r_o^{-3}-r_m^{-3})\gamma_bk_e}{(r_o^{-3}-r_m^{-3})\gamma_bk_e + (r_m^{-3}-r_i^{-3})\gamma_ek_b} \tag{11}$$

把(11)式代入(8)式得到炸药球壳的速度分布瞬态解为

$$[v(r,t)]_e = \frac{\gamma_e\gamma_b}{2[(r_o^{-3}-r_m^{-3})\gamma_bk_e + (r_m^{-3}-r_i^{-3})\gamma_ek_b]r^2}\left(p_0-p_g-2\sqrt{3}k_b\ln\frac{r_m}{r_i}-2\sqrt{3}k_e\ln\frac{r_o}{r_m}\right) \tag{12}$$

2.2 炸药球壳温度变化率求解

弹粘塑性变形所做的功为

$$\mathrm{d}W = (\sigma_r-\sigma_\theta)\mathrm{d}\varepsilon_r \tag{13}$$

其中

$$\mathrm{d}\varepsilon_r = \frac{\partial v}{\partial r}\mathrm{d}t \tag{14}$$

假设弹性变形代表炸药粒子重新排列导致的变形,几乎不产生热量,所以忽略弹性变形导致的温升,应力-应变关系为

$$\sigma_r-\sigma_\theta = \sqrt{3}k_e\left[\frac{1}{\sqrt{3}\gamma_e}\left(\frac{\partial v}{\partial r}-\frac{v}{r}\right)+1\right] \tag{15}$$

把(12)式分别代入(14)式和(15)式,得

$$\mathrm{d}\varepsilon_r = \left\{-\frac{\gamma_e\gamma_b}{[(r_o^{-3}-r_m^{-3})\gamma_bk_e + (r_m^{-3}-r_i^{-3})\gamma_ek_b]r^3}\left(p_0-p_g-2\sqrt{3}k_b\ln\frac{r_m}{r_i}-2\sqrt{3}k_e\ln\frac{r_o}{r_m}\right)\right\}\mathrm{d}t \tag{16}$$

$$\sigma_r-\sigma_\theta = -\frac{3\gamma_bk_e}{2[(r_o^{-3}-r_m^{-3})\gamma_bk_e + (r_m^{-3}-r_i^{-3})\gamma_ek_b]r^3}\left(p_0-p_g-2\sqrt{3}k_b\ln\frac{r_m}{r_i}-2\sqrt{3}k_e\ln\frac{r_o}{r_m}\right)-\sqrt{3}k_e \tag{17}$$

由于 $p_0\gg k_e$,(17)式简化为

$$\sigma_r-\sigma_\theta=-\frac{3\gamma_b k_e}{2[(r_o^{-3}-r_m^{-3})\gamma_b k_e+(r_m^{-3}-r_i^{-3})\gamma_e k_b]r^3}\left(p_0-p_g-2\sqrt{3}k_b\ln\frac{r_m}{r_i}-2\sqrt{3}k_e\ln\frac{r_o}{r_m}\right) \tag{18}$$

将(16)式和(18)式代入(13)式,得

$$\mathrm{d}W=\frac{3\gamma_e\gamma_b^{\,2}k_e}{2}\frac{\left(p_0-p_g-2\sqrt{3}k_b\ln\frac{r_m}{r_i}-2\sqrt{3}k_e\ln\frac{r_o}{r_m}\right)^2}{[(r_o^{-3}-r_m^{-3})\gamma_b k_e+(r_m^{-3}-r_i^{-3})\gamma_e k_b]^2 r^6}\mathrm{d}t \tag{19}$$

由力学变形做功引起的温升 $\mathrm{d}T$ 为:$\mathrm{d}T=\mathrm{d}W/\rho c_p$,其中 c_p 是炸药的等压比热。所以,可得出力学变形引起的温度变化率为

$$\left(\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}\right)_{\mathrm{MD}}=\left(\frac{3\gamma_e\gamma_b^{\,2}k_e}{2\rho c_p}\right)\frac{\left(p_0-p_g-2\sqrt{3}k_b\ln\frac{r_m}{r_i}-2\sqrt{3}k_e\ln\frac{r_o}{r_m}\right)^2}{[(r_o^{-3}-r_m^{-3})\gamma_b k_e+(r_m^{-3}-r_i^{-3})\gamma_e k_b]^2 r^6} \tag{20}$$

下标 MD 表示力学变形。可以看出,力学变形引起的温升随时间单调增加,随半径单调减小。

紧随力学变形后,炸药中同时存在热传导和化学反应两个过程,这两个过程都依赖于炸药中温度的分布,而且同时又改变这个分布。因此,球壳内总的温度变化用下式描述[8]

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}=\left(\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}\right)_{\mathrm{MD}}+\frac{1}{\rho c_p}\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2k^*\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{Q}{\rho c_p}\frac{\mathrm{d}\Lambda}{\mathrm{d}t} \tag{21}$$

式中:第 1 项是力学变形引起的温升,第 2 项是热传导引起的温度变化,第 3 项是化学反应引起的温升。

2.3 炸药热点反应速率求解

球壳胞元的温度为

$$T(r,x,t)=T_0(r,x,t)+\int_0^t\frac{\mathrm{d}T(r,x,t)}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t \tag{22}$$

对球壳胞元内的温升使用 Arrhenius 律,可得到球壳胞元内的局部反应速率

$$\frac{\mathrm{d}\Lambda(r,x,t)}{\mathrm{d}t}=(1-\Lambda)Z\exp\left(-\frac{T^*}{T(r,x,t)}\right) \tag{23}$$

对局部反应速率 $\mathrm{d}\Lambda(r,x,t)/\mathrm{d}t$ 在炸药球壳胞元内积分就可以得到热点反应速率为

$$\frac{\mathrm{d}\lambda_h(x,t)}{\mathrm{d}t}=\int_{r_m}^{r_o}\frac{\frac{\mathrm{d}\Lambda}{\mathrm{d}t}(r,x,t)4\pi r^2}{\frac{4}{3}\pi(r_o^3-r_m^3)}\mathrm{d}r \tag{24}$$

从推导过程可以看出,该热点反应速率中的参数均为炸药本身的热力学参数,不需要通过冲击起爆实验进行标定。

3 三项式细观反应速率模型

反应速率模型包含 3 项,分别模拟冲击作用下炸药颗粒间孔洞塌缩形成的热点、低压下孤立热点缓慢成长和高压下热点合并反应快速完成 3 个阶段,其中第 1 项采用上面基于弹粘塑性双球壳塌缩模型得到的热点反应项,第 2 项采用 Kim 的低压下慢反应项[9],第 3 项采用张震宇等建立的高压反应速率方程[11],最后得到冲击起爆三项式反应速率方程的形式为[13-15]

$$\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}\lambda_h}{\mathrm{d}t}+\frac{3\lambda^{2/3}}{r_o}ap^n+Gp^z(1-\lambda)^x \tag{25}$$

式中:a、n、G、z、x 是未知参数,通过拟合冲击起爆过程的实验数据确定。

上述三项式反应速率方程的形式与文献[13-15]提出的相同,但是热点反应项的具体表达式不同,本研究的热点反应项在 Kim 单球壳模型考虑炸药颗粒度和孔隙度的基础上还考虑了 PBX 炸药中的粘结剂效应。下面仅给出粘结剂强度和含量对 PBX 炸药冲击起爆过程影响的数值模拟结果。

4 粘结剂强度和含量对 PBX 炸药起爆过程影响的数值模拟

把上面建立的三项式反应速率方程加入 DYNA2D 中,对厚铝板以 960 m/s 的速度撞击 PBX-9501

炸药(粘结剂和炸药体积比为 7.3/92.7)的冲击起爆过程进行计算。

PBX-9501 与 PBX-9404 炸药的基体相同,均为 HMX,因此反应速率方程中热点反应项的参数可取文献[9]中的参数,如表 1 所示;慢反应项和高压反应项的参数 a、n、G、z、x 通过遗传算法[14]拟合冲击起爆的压力历史数据得到,如表 2 所示。

表 1　Kim 反应速率模型中的 PBX-9404 炸药热点反应项参数[9]

Table 1　PBX-9404 parameters for the first term used in Ref.[9]

$Z/(s^{-1})$	$T^*/(K)$	$T_0/(K)$	$C_p/[m^2/(s^2\cdot K)]$	$k_e/(MPa)$	$Q/(km^2/s^2)$	$k^*/[m/(s\cdot K)]$
5.0×10^{19}	26 500	298	1.4×10^3	8.0	5.439	8.0×10^{-10}

表 2　PBX-9501 炸药慢反应项和高压反应项的参数

Table 2　Reaction rate parameters of the second and third terms for PBX-9501

a	n	G	z	x
0.025 19	1.985 122	3 972	3.4	1.33

计算中,铝飞片和 PBX-9501 炸药的本构模型均取流体弹塑性模型,PBX-9501 炸药和爆轰产物的状态方程均采用 JWL 状态方程,参数均取自文献[16]。

PBX-9501 炸药的最大理论密度为 1.860 g/cm^3,假设其初始密度为 1.830 g/cm^3,初始颗粒半径为 $r_o=51.52$ μm,根据公式(1)和公式(2)即可计算得到初始孔隙半径为 $r_i=13.02$ μm,粘结剂和炸药交界处的半径 $r_m=22.91$ μm。

图 3 是计算得到的典型结果,为 PBX-9501 炸药中不同拉格朗日位置的压力变化历史,可以看出:炸药受到冲击作用后,化学反应产生的压缩波不断增长,向前追赶冲击波阵面,最终导致在炸药中形成稳定爆轰,清楚地反映了冲击作用下炸药起爆和爆轰成长的过程。图 4 是同一加载条件(铝飞片速度均为 960 m/s)6 种粘结剂强度($k_b=5,6,7,8,9,10$ MPa)的炸药冲击波阵面压力随时间变化的情况,可以看出:随着粘结剂强度的增加,冲击波阵面压力增长变慢。当压力达到稳定,炸药完全爆轰。为了方便读取,以炸药中爆轰压力达到 25 GPa 的时间作为到爆轰时间,可以获得对应粘结剂的强度分别为 5、6、7、8、9 和 10 MPa 的 PBX-9501 炸药到爆轰时间分别为:1.024、1.057、1.078、1.108、1.157 和 1.190 μs,表明粘结剂强度增加将导致炸药的到爆轰距离变长,炸药的感度降低。

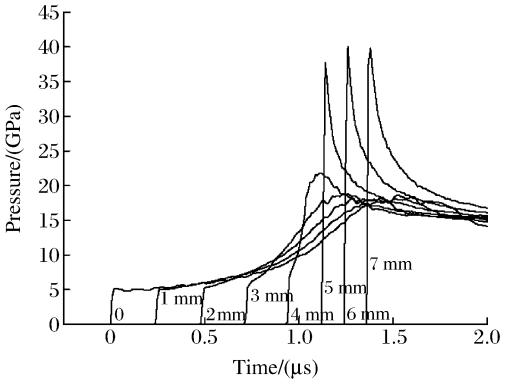


图 3　不同拉格朗日位置的压力变化历史

Fig. 3　Simulated pressure histories for PBX-9501 impacted at 960 m/s by an aluminum flyer

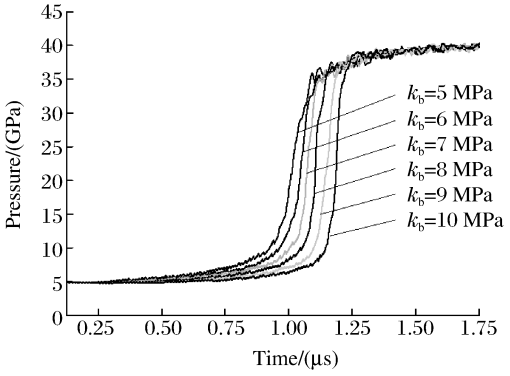


图 4　不同粘结剂强度冲击波阵面压力增长过程比较

Fig. 4　Simulated pressure growth process of shock wave front for PBX-9501 with different strengths of binder

图 5 是同一加载条件下(铝飞片速度均为 960 m/s),粘结剂强度与炸药强度相同($k_b=k_e=8$ MPa),5 种粘结剂含量($V_b=0\%,3\%,5\%,7.3\%,10\%$)的炸药冲击波阵面压力随时间变化的情况,可以看出:随着粘结剂含量增加,冲击波阵面压力增长变慢。同样以炸药中爆轰压力达到 25 GPa 时的时间作为到爆轰时间,可以获得对应粘结剂含量分别为 1%、3%、5%、7.3%和 10%的炸药到爆轰时间分别为:1.017、1.031、1.070、1.109 和 1.183 μs,表明粘结剂含量增加将导致炸药的到爆轰距离变长,炸药的感度降低。

本研究还计算了粘结剂强度与炸药强度不相同时,粘结剂含量对冲击起爆和爆轰过程的影响,包括粘结剂强度小于炸药强度的情况($k_b=5$ MPa,$k_b=6$ MPa 和 $k_b=7$ MPa),以及粘结剂强度大于炸药强度的情况($k_b=9$ MPa 和 $k_b=10$ MPa)。图 6 是在同一加载条件下,到爆轰时间随粘结剂强度和含量的变化情况,可以看出:粘结剂含量相同时,到爆轰时间随粘结剂强度的增加而增加;粘结剂强度相同时,到爆轰时间随粘结剂含量的增加而增加,都与常规认识相符合。但是当粘结剂强度比炸药强度小时($k_b=5,6$ MPa),对于炸药中不含粘结剂的情况($V_b=0\%$),到爆轰时间反而长,与计算结果的总体趋势不相符合。这可能是由于本研究的热点反应模型仅考虑了孔洞塌陷一种热点形成机制。当炸药中不含粘结剂时,炸药颗粒与颗粒之间的摩擦和剪切机制可能是热点形成的主要原因。

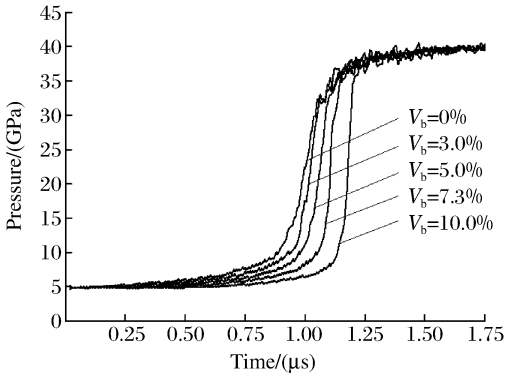


图 5 不同粘结剂含量下冲击波阵面压力增长过程比较

Fig. 5 Simulated pressure growth process of shock wave front for PBX-9501 with different contents of binder

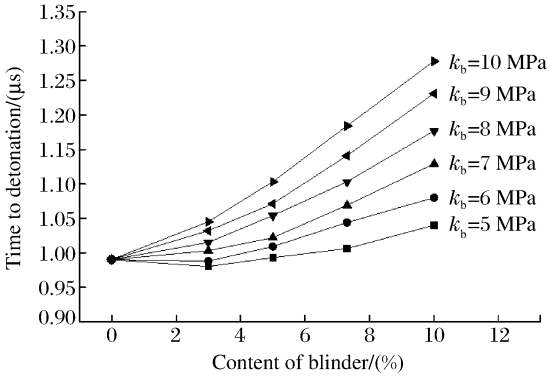


图 6 粘结剂强度和含量对到爆轰时间的影响

Fig. 6 Simulated change of time to detonation with strength and content of binder

5 结 论

在 Kim 弹粘塑性单球壳塌缩模型的基础上,考虑了 PBX 炸药中的粘结剂效应,建立了弹粘塑性双球壳塌缩热点反应模型,给出了炸药球壳在冲击压力作用下的速度、应变、温度和化学反应率的时空分布,以及新的热点反应速率理论表达式。

本研究建立的模型不仅可以反映炸药颗粒度和孔隙度的影响,还可以较好地描述粘结剂强度和含量对 PBX 炸药冲击起爆感度的影响,数值模拟结果与常规认识相符合。

本研究建立的模型体现了冲击作用下炸药中颗粒间孔洞塌缩的热点形成机制,但对冲击作用下炸药颗粒之间摩擦、剪切等其它机制引起的热点点火还没能涉及,因此,在以后的研究中,可以考虑其它机制对热点点火的作用以及在冲击起爆过程中的贡献,建立更加合理的反应速率模型。

References:

[1] Mader C L. Numerical Modeling of Detonation [M]. Berkeley, USA: University of California Press, 1979.

[2] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological Model of Shock Initiation in Heterogeneous Explosives [J]. Phys Fluids,

1980,23(12):2362-2372.

[3] Tarver C M, Hallquist J O. Modeling Two-Dimensional Shock Initiation and Detonation Wave Phenomena in PBX-9404 and LX-17 [A]//Short J M. Proceedings of the 7th Symposium (International) on Detonation [C]. Annapolis, MD, 1981:488-497.

[4] Tarver C M, Hallquist J O, Erickson L M. Modeling Short Pulse Duration Shock Initiation of Solid Explosives [A]//Proceedings of the 8th Symposium (International) on Detonation [C]. Albuquerque, NM, 1985:951-961.

[5] Johnson J N, Tang P K, Forest C A. Shock-Wave Initiation of Heterogeneous Reactive Solids [J]. J Appl Phys, 1985,57(9):4323-4334.

[6] Tang P K, Johnson J N, Forest C A. Modeling Heterogeneous High Explosive Burn with an Explicit Hot-spot Process [A]//Proceedings of the 8th Symposium (International) on Detonation [C]. Albuquerque, NM, 1985:52-61.

[7] Field J E. Hot Spot Ignition Mechanisms for Explosives [J]. Accounts Chem Res, 1992, 25:489-496.

[8] Kim K, Sohn C H. Modeling of Reaction Bulidup Processes in Shocked Porous Explosives [A]//Proceedings of the 8th Symposium (International) on Detonation [C]. Albuquerque, NM, 1985:926-933.

[9] Kim K. Development of a Model of Reaction Rates in Shocked Multicomponent Explosives [A]//Proceedings of the 9th Symposium (International) on Detonation [C]. Portland, OR, 1989:593-603.

[10] Wen L J, Duan Z P, Zhang Z Y, et al. A Pore Collapse Model of Double Hollow Sphere with Rigid-Plastic Binders for Hot-Spot Ignition in Shocked Explosives [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(8):883-887. (in Chinese)
温丽晶,段卓平,张震宇,等. 刚塑性粘结剂的双球壳塌缩热点反应模型 [J]. 北京理工大学学报,2011,31(8):883-887.

[11] Zhang Z Y, Lu F Y, Wang Z B, et al. Studies on High-Pressure Reaction Rate of PBX-9404 [J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(4):360-364. (in Chinese)
张震宇,卢芳云,王志兵,等. PBX-9404 炸药高压反应速率方程的研究 [J]. 爆炸与冲击,1999,19(4):360-364.

[12] Perzyna P. Fundamental Problems in Viscoplasticity [J]. Adv Appl Mech, 1966, 9:350-352.

[13] Liang Z Y, Huang F L, Zhang Z Y. Numerical Simulation of Damaged Explosive in Shock Detonation [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(12):1047-1051. (in Chinese)
梁增友,黄风雷,张震宇. 损伤炸药的冲击起爆数值模拟 [J]. 北京理工大学学报,2006,26(12):1047-1051.

[14] Tian Z D, Zhang Z Y. A Mesomechanic Model of Shock Initiation in PBX-9404 Explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007, 15(5):464-467. (in Chinese)
田占东,张震宇. PBX-9404 炸药冲击起爆细观反应速率模型 [J]. 含能材料,2007,15(5):464-467.

[15] Liang Z Y, Huang F L, Zhang Z Y. Study on New Reaction Rate Function Model of PBX-9404 for Damaged Explosive Initiation Behavior [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(1):38-43. (in Chinese)
梁增友,黄风雷,张震宇. PBX-9404 的化学反应速率方程及起爆特性 [J]. 爆炸与冲击,2008,28(1):38-43.

[16] Tarver C M, Forbes J W, Garcia F, et al. Manganin Gauge and Reactive Flow Modeling Study of the Shock Initiation of PBX 9501 [A]//Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. New York: AIP Conference Proceedings, 2002:: 1043-1046.

An Elastic/Viscoplastic Pore Collapse Model of Double-Layered Hollow Sphere for Hot-Spot Ignition in Shocked Explosives

WEN Li-Jing[1], DUAN Zhuo-Ping[1], ZHANG Zhen-Yu[2],
OU Zhuo-Cheng[1], HUANG Feng-Lei[1]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Institute of Technical Physics, College of Science, National University of Defense Technology, Changsha* 410073, *China*)

Abstract: An elastic/viscoplastic pore collapse model of double-layered hollow sphere, in which the

effect of the binder in Plastic Bonded Explosives (PBX) was taken into account, was developed as a hot-spot ignition model in shocked explosives. The space and time distributions of the velocity, strain, temperature and chemical reaction rate in shock compression of the explosive hollow sphere were theoretically calculated. A new expression of reaction rate equation was obtained for the hot-spot ignition. The three-term reaction rate model, consisting of the new hot-spot ignition term, the slow burning term at low-pressure from Kim and the high-pressure reaction term from ZHANG Zhen-Yu, was implemented into the two-dimensional, hydrodynamic finite-element code DYNA2D and used to simulate the one-dimensional shock initiation process of PBX-9501 explosive. The numerical results show that the model can successfully explain the influence of strength and content of the binder in PBX on the shock initiation, and that of particle size and porosity as well.

Key words: shock initiation; reaction rate model; hot-spot ignition model; plastic bonded explosives; binder

《高压物理学报》征稿简则

《高压物理学报》是我国高压物理领域唯一的专业性学术刊物，在国内外公开发行。力求及时报道高压物理学科基础理论和应用研究方面具有创新性、高水平、有重要意义的研究成果，读者对象为国内外科技工作者。征稿内容为动态及静态高压技术，人工合成新材料，高温高压下材料的力学、光、电、磁等特性以及物质微观结构的研究，动态及静态高压研究中的测试技术，高温高压下的相变，高温高压物态方程等。接受中、英文稿件。

1. 来稿应具有科学性、先进性和实用性，论点明确、论据可靠、数据准确、逻辑严谨、文字简练、图表清晰。每篇论文的篇幅应在 6 000～8 000 字以内，请使用中华人民共和国法定计量单位。论文格式请参考近期出版的《高压物理学报》。请使用网站(www. gywlxb. cn)的作者投稿系统进行投稿。

2. 所投稿件不得涉及国家及本单位机密，投稿时请附本单位保密审查意见，由审查者签名并加盖公章。

3. 文章标题字数应在 20 字以内。文中图、表应有自明性，所有图题、图注、表题、表注均为中、英文对照，图、表中的文字一律用英文。

4. 第一作者应确保全体作者同意文章署名，请提供第一作者、通讯作者简介(姓名、出生年、性别、职称、学位、研究方向等)，以及所有联系方式(通信地址、邮政编码、电话号码、传真、电子邮箱等)，以备联系。请注明论文(工作)的资助项目(资助项目名称和批准号)，简要介绍工作背景和论文意义。

5. 来稿应保证文章版权的独立性，严禁抄袭，文责自负，请勿一稿多投。

重点注意事项

▲ 中英文摘要 摘要用第三人称书写，语言要简练，应有具体内容。要求：(1) 拥有与论文同等量的主要信息，重点包括 4 个要素：即研究目的、方法、结果和结论。(2) 以提供论文梗概为目的，不得评论、解释论文内容。中文摘要应在 200～400 个字之间，英文摘要不少于 120 个实词。为便于 Ei Compendex 以及国外其它数据库收录，英文摘要中尽量避免特殊字符(各种数学符号、上下脚标及希腊字母)及由特殊字符组成的数学表达式；第一句不要与英文题名重复；尽量用短句子并避免句形单调；用过去时态叙述主要工作，用现在时态叙述结论，尽量用主动语态代替被动语态。

▲ 参考文献 参考文献应是公开出版物。请充分著录参考文献，引用条数不宜太少，并尽量引用近期国内外文献，采用“顺序编码制”著录。中文参考文献必须附英译文，著录项目应齐全。

▲ 版权与稿酬 《高压物理学报》已加入《中国学术期刊(光盘版)》、万方数据——数字化期刊群、中国核心期刊(遴选)数据库、中文科技期刊数据库、中国期刊网、台湾中文电子期刊服务——思博网(CEPS)等，并被 Ei Compendex 光盘收录。凡经本刊录用的稿件，其著作权(包括光盘版和网络版出版权)便自动转让给《高压物理学报》编辑部，编辑部不再另行通知。来稿一经发表，即付稿酬(包括光盘版和网络版稿酬)。

《高压物理学报》一贯秉承服务科学、服务读者、服务作者的办刊理念，慎重对待每一篇来稿，尊重作者劳动。优秀稿件享有快速发表通道，重大创新性成果可在 3 个月内刊出。

通信地址：四川绵阳 919 信箱 110 分箱《高压物理学报》编辑部，邮政编码：621900

网　　站：www. gywlxb. cn　　电子邮件：gaoya@caep. ac. cn

电　　话：(0816)2490042　　传　　真：(0816)2485139

《高压物理学报》编辑部