DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0807-06

# 基于力热耦合材料模型的 Steven 试验数值模拟方法*

楼建锋,张延耿,周婷婷,洪 滔
(北京应用物理与计算数学研究所,北京 100094)

**摘要**:在力热耦合材料模型中,增加炸药自热放能模型,建立了 Steven 试验的力-热-化耦合的数值模拟方法。数值计算模型中,应力应变关系采用双线性硬化弹塑性模型,炸药受力后的热作用采用各向同性热材料模型,炸药的化学反应采用 Arrhenius 反应率函数,同时还考虑了升温和熔化对材料力学、热学性能的影响。针对标准 Steven 试验,通过数值分析得到了靶板的变形情况和炸药点火的速度阈值,将计算结果与实验数据进行了比较,两者符合较好。表明该方法可以较好地模拟 Steven 试验,而且与以往的分析模型和方法相比,本文的方法不需要增加经验性的点火准则和判据,具有更广泛的适用性,可以为研究低速撞击条件下炸药的力热响应和局域化点火问题提供参考。

**关键词**:Steven 试验;力热耦合;低速撞击;非冲击点火
**中图分类号**:O381 **国标学科代码**:1303510 **文献标志码**:A

炸药在加工、存贮和运输等过程中可能会发生意外事故,这些事故中炸药会经受低速撞击、摩擦甚至火烧等刺激。这些刺激条件下炸药的响应,通常不是冲击波直接引起的,是目前炸药安全性研究需要关心的重要问题。其中,低速撞击条件通常速度不超过 100 m/s,炸药受到的撞击压力约几十到几百兆帕,而压力作用时间较长,约几百微秒。与冲击起爆机制不同,低速撞击条件下炸药发生点火的过程比较复杂,通常有塑性功引起的热量集中、热点形成、炸药点火、缓慢燃烧、燃烧转爆轰等。

目前,用于研究低速撞击条件下炸药安全性问题的主要方法是开展基准实验,以及在这些实验基础上发展点火判据进行评估。基准实验主要有 Steven 试验、Drop hammer 试验、Susan 试验、Spigot 试验等,其中 Steven 试验是研究各类炸药在低速撞击条件下相对敏感度的有效工具。S. K. Chidester 等[1]初步研究了 Steven 试验方法,并应用于滞后爆轰转变(XDT)现象研究。S. K. Chidester 等[2]、D. J. Idar 等[3]、R. J. Scammon 等[4]、K. S. Vandersall 等[5]、S. Wortley 等[6]针对 HMX 基炸药进行了一系列低速撞击 Steven 试验,获得了炸药在不同撞击速度下的响应情况,同时也考虑了弹丸头部形状的影响以及炸药老化问题,并采用点火增长模型进行了数值分析。L. L. Switzer 等[7]进行了不同温度下的 Steven 试验,分析了温度对炸药发生反应的弹头阈值速度的影响。在上述工作中,主要通过实验直观上观察炸药反应情况,没有关注炸药反应细节,在数值模拟研究方面,主要是采用基于压力的点火增长反应率模型[8-9],而尽管该反应率模型在炸药冲击起爆问题的数值模拟方面具有广泛的应用[9-17],但很难用于模拟低强度冲击作用下炸药的点火反应问题。

本文中,基于力热耦合材料模型,增加炸药的自热放能模型,建立 Steven 试验的力-热-化耦合的数值模拟方法。数值计算模型中,应力应变关系采用双线性硬化弹塑性模型,炸药受力后的热作用采用各向同性热材料模型[18-19],炸药的化学反应采用 Arrhenius 反应率函数,同时还考虑升温和熔化对材料力学性能和热学性能的影响。针对文献[2-3]的 Steven 试验,通过数值分析得到了靶板的变形情况和炸药点火的速度阈值,将计算结果与实验数据进行比较,校验计算模型及其适用性。

* **收稿日期**:2016-01-29;**修回日期**:2016-06-12
**基金项目**:国家自然科学基金项目(11302031,11402031);中国工程物理研究院科学技术发展基金项目(2014B0101014);中国工程物理研究院安全弹药研发中心开放基金项目(RMC2014B02)
**第一作者**:楼建锋(1980— ),男,博士,副研究员;**通信作者**:张延耿,zhang_yangeng@iapcm.ac.cn。

## 1 Steven 试验模型

Steven 试验装置主要包括一个弹丸和一个装炸药的圆盘，装置结构示意图如图 1 所示。装药圆盘由 6 部分组成，包括螺栓、压环、样品盒、盖板、炸药试样和底座。被测试炸药镶嵌在基础圆盘内，炸药被撞击面有一层薄盖板，改进的 Steven 装置（见图 1(b)）中，在炸药和基础圆盘之间增加了一层聚四氟乙烯环。

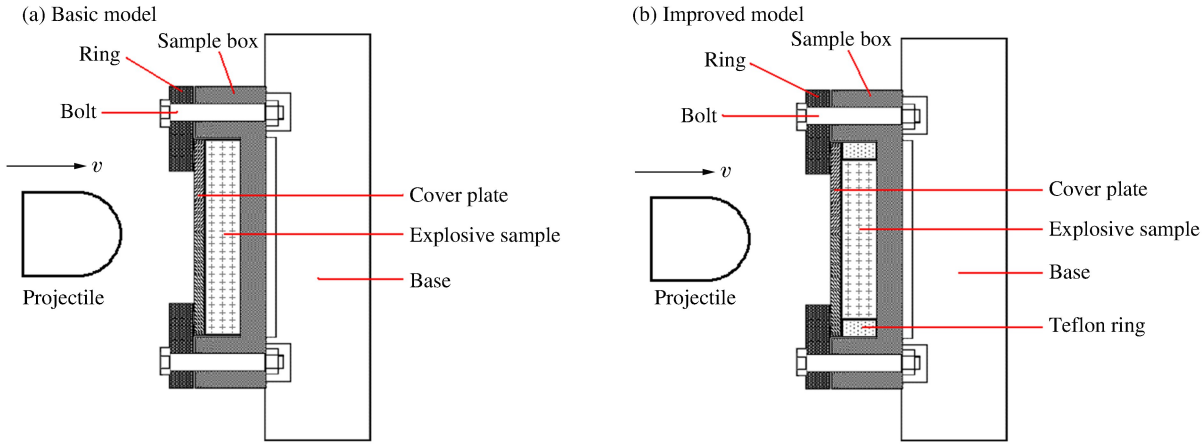



图 1 Steven 试验装置结构示意图

Fig. 1 Configuration for Steven test

## 2 数值计算模型的建立

### 2.1 炸药力热耦合材料模型

炸药的力学响应采用双线性硬化弹塑性模型。材料本构为应力 $\sigma$ 与应变 $\varepsilon$ 保持线性关系，当应力大于屈服应力 $\sigma_s$ 时，材料进入塑性，如果继续加载则斜率发生变化，从 $E$（杨氏模量）变化成 $E_t$（切向模量）；卸载段曲线与加载段曲线斜率相同，卸载后材料中将保留塑性变形。其表达式为：

$$\sigma=\begin{cases}E\varepsilon & \sigma<\sigma_s\\ E_t\varepsilon & \sigma\geqslant\sigma_s\end{cases} \tag{1}$$

使用热材料模型进行热力耦合计算的基本方程为：

$$\sigma_{ij}^{\nabla}=C_{ijkl}(\dot{\varepsilon}_{kl}-\dot{\varepsilon}_{kl}^{T})+\dot{\theta}_{ij}\,\mathrm{d}T \tag{2}$$

$$\dot{\theta}_{ij}=\frac{\mathrm{d}C_{ijkl}}{\mathrm{d}T}C_{klmn}^{-1}\dot{\sigma}_{mn} \tag{3}$$

$$\mathbf{C}_{ijkl}=\frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\begin{pmatrix}1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0\\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0\\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \dfrac{1-2\nu}{2} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dfrac{1-2\nu}{2} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dfrac{1-2\nu}{2}\end{pmatrix} \tag{4}$$

式中：$\nu$ 是泊松比。

热应变通过热膨胀计算得到：

$$\dot{\varepsilon}_{kl}^{T}=\alpha\dot{T}\delta_{ij} \tag{5}$$

式中：$\alpha$ 是热膨胀系数，$\delta_{ij}$ 是克罗内克函数。

### 2.2　炸药自热放能模型

炸药受到弹丸撞击，材料塑性流动会引起温度升高，而温升会引发炸药化学反应放热，使温度进一步升高。采用阿累尼乌斯(Arrhenius) 反应率函数描述炸药化学反应放热。炸药在单元时间内因发生化学反应而放出的热量为：

$$Q=\rho\Delta HZ\mathrm{e}^{-\frac{E}{RT}} \tag{6}$$

式中：$\rho$ 为炸药的质量，$\Delta H$ 是单位质量炸药反应放出的热量，$Z$ 是指前因子，$E$ 是炸药的活化能，$R$ 是气体常数，$T$ 为炸药温度。

当弹丸撞击速度达到某个临界值时，在塑性功和炸药自热反应的共同作用下，可能会引起局部温度迅速升高甚至熔化现象。因此，考虑了温度对炸药材料力学性能和热学性能的影响，随着温度的升高，材料的物性参数也发生相应的变化。

## 3　数值计算模型的验证

为了验证计算模型的有效性，针对文献[3-4]中的 Steven 试验装置建立了数值计算模型，使用 LS-DYNA 中的拉氏算法建模，网格大小约为每个单元 1 mm。依据实验数据，开展了一系列数值模拟，通过对比 Steven 装置中装药盖板和样品盒背板的变形情况，以及引发炸药点火的撞击速度阈值，校验了计算模型。炸药试样是 PBX9501，直径 127 mm、厚度 12.7 mm。盖板材料是 304 不锈钢，直径 127 mm、厚度 3 mm。样品盒材料是不锈钢(A36)，背板厚度 19.2 mm。样品盒和炸药之间存在 3.18 mm的间隙。撞击弹丸质量是 2 kg，其半球形头部半径是 38 mm。图 2 是计算模型的初始图像，图 3 是被弹丸撞击后基础圆盘的变形情况。

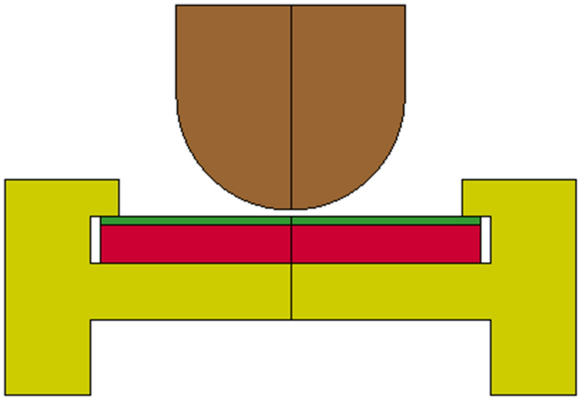


图 2　计算模型的初始图像

Fig. 2　Initial configuration of simulation model

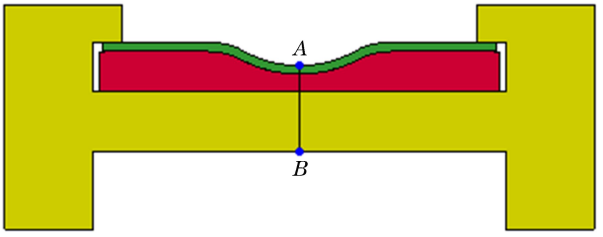



图 3　被弹丸撞击后靶板的计算图像

Fig. 3　Deformed state of target impacted by projectile

### 3.1　装药盖板和样品盒背板的变形

针对炸药没有发生剧烈反应的情况，弹丸撞击速度为 36.9 m/s，考察盖板和样品盒背板的变形情况，测量了盖板中心($A$ 处)的凹陷深度，以及样品盒背板中心($B$ 处)的应变情况。盖板中心凹陷深度的实验结果为 8.3 mm[4]，文献[4]中的计算结果为 9.1 mm，本文的计算结果为 8.6 mm。由于模型中考虑了升温对炸药力学、热学性能的影响，所得结果与实验数据更接近。样品盒背板中心应变的对比情况如图 4 所示，计算结果和实验结果符合较好。

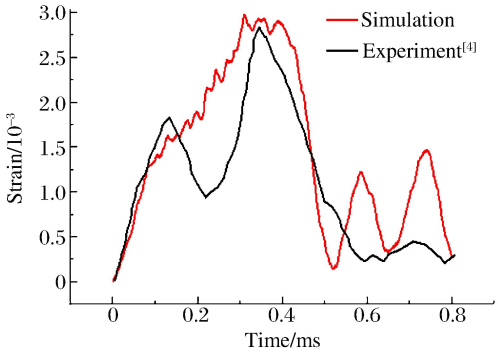



图 4　样品盒背板中心应变的对比

Fig. 4　Comparison of strain at center of holder's back plate

### 3.2 引发炸药点火的撞击速度阈值

针对 D. J. Idar 等[3]、S. K. Chidester 等[2]的实验装置，开展了一系列数值模拟，分析了不同撞击速度下 PBX9501 炸药的力热响应规律，得到引发炸药点火的撞击速度阈值。其中，文献[2]中的 Steven 试验装置为图 1(b)所示的改进模型。

数值模拟结果显示，随着弹丸撞击，炸药跟随盖板一同被压缩，炸药中间逐渐产生较大变形，发生塑性流动，形成了高温高压的绝热剪切带。图 5～6 分别显示了弹丸撞击速度为 48 m/s 时 0.3 ms 时刻的温度云图和压力云图，可以看到炸药中间出现了明显的热量、应力集中现象。对于两种实验装置，数值模拟结果相似。

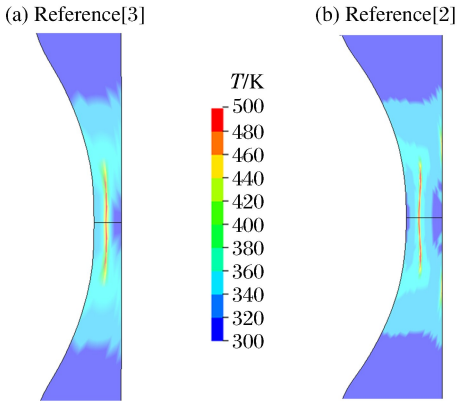



图 5 典型时刻温度云图对比

Fig. 5 Comparison of temperature profile at typical time

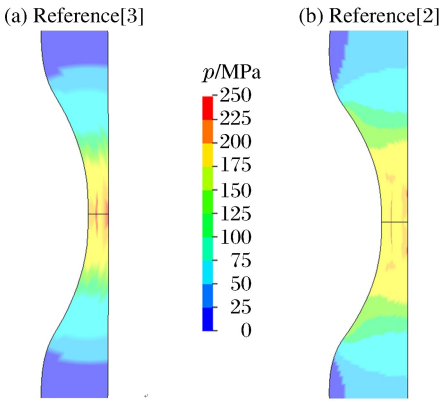



图 6 典型时刻压力云图对比

Fig. 6 Comparison of pressure profile at typical time

图 7 显示了不同撞击速度下，炸药内点火位置的温升曲线。撞击速度较低(37、43、45 m/s)时，温升比较缓慢；随着撞击速度增加，温升加快。但是当弹丸开始反弹时，如果炸药内没有形成持续的放热反应，温度也没有达到点火温度，那么随后炸药温度会降低、不会发生点火，而如果撞击速度达到某个临界值后，炸药内温升迅速增加，在弹丸反弹前就超过了炸药点火温度，并形成持续放热反应，那么将导致炸药点火。对于这两种装置，有相同的规律。

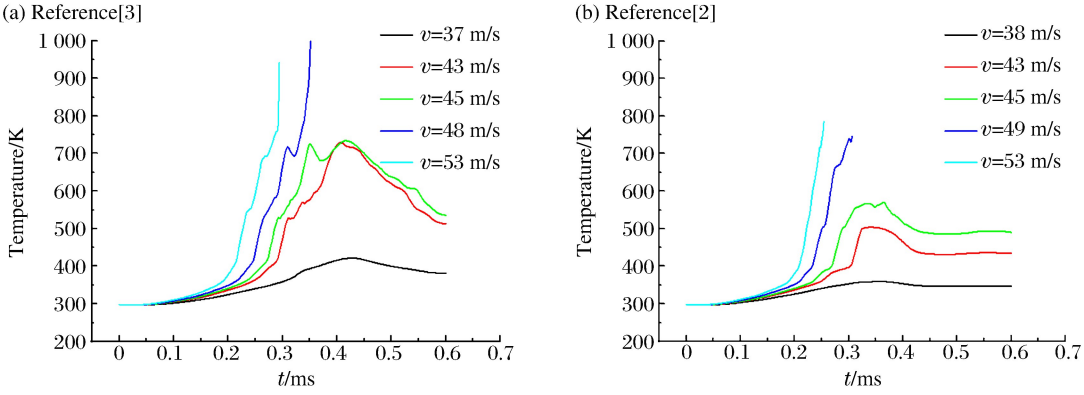



图 7 不同撞击速度下点火位置的温升

Fig. 7 Temperature variation of ignition point at different impact velocities

本文中计算得到的引发炸药点火的撞击速度阈值与文献[2-4]中数据的对比情况见表 1，两者符合较好，表明本文中基于力热化耦合模型建立的计算模型可以较好地模拟 Steven 试验。尽管在数据中没有体现本文模型在速度阈值预测精度方面的优越性，但是相对于以往的分析模型和方法[1,4]，本文的数值模拟方法在描述局域化温升机制时考虑了炸药自热放能效应，且不需要增加经验性的点火准则和判据，在揭示点火机制方面更合理，具有更广泛的适用性。

**表 1 炸药点火反应的速度阈值与实验数据比较**

**Table 1 Predicted threshold of impact velosity inducing explosive ignision compared experimental data**

| 文献 | $v/(\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1})$ | | |
|---|---|---|---|
| | 实验[4] | 计算[4] | 本文计算 |
| [3] | 54～56 | 44～45 | 45～48 |
| [2] | 43～53 | 45～50 | 45～49 |

## 4 小　结

对于 Steven 试验的数值分析，由于炸药承受的载荷强度低、作用时间长，发生非冲击点火的机制非常复杂，现有的模型还不能够准确描述其中复杂的物理化学过程。R. J. Scammon 等[4]开展的数值分析工作，主要通过有限元程序获得实验中炸药样品的力学响应，同时结合实验数据建立点火准则的半经验公式(点火时间跟炸药承受的压力和应变率相关)，由此预估发生点火时弹丸的临界速度阈值。而本文中在考虑炸药局部变形引起温升的基础上，增加自热放能效应，建立力-热-化学反应耦合模型，描述炸药在低速撞击作用下的力热响应过程，较好地反映了炸药发生局部点火的物理机制。这为研究低速撞击条件下炸药局域化温升和非冲击点火的安全性问题提供了参考。

## 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]// Proceeding of 10th International Detonation Symposium. 1993:785-792.

[2] Chidester S K, Tarver C M, Garza R. Low amplitude impact testing and analysis of pristine and aged solid high explosives[C]// Proceeding of 11th International Detonation Symposium. 1998:93-100.

[3] Idar D J, Lucht R A, Straight J W, et al. Low amplitude insult project: PBX 9501 high explosive violent reaction experiments[C]// Proceeding of 11th International Detonation Symposium. 1998:102-110.

[4] Scammon R J, Browning R V, Middleditch J, et al. Low amplitude insult project: Structural analysis and prediction of low order reaction[C]// Proceeding of 11th International Detonation Symposium. 1998:111-118.

[5] Vandersall K S, Chidester S K, Forbes J W, et al. Experimental and modeling studies of crush, puncture, and perforation scenarios in the steven impact test[C]// Proceeding of 12th International Detonation Symposium. 2002: 131-139.

[6] Wortley S, Jones A, Cartwright M, et al. Low speed impact of pristine and aged solid high explosive[C]// Proceeding of 12th International Detonation Symposium. 2002:399-408.

[7] Switzer L L, Vandersall K S, Chidester S K, et al. Threshold studies of heated HMX-based energetic material targets using the Steven impact test[C]// Proceeding of Shock Compression of Condensed Matter. 2003:1045-1048.

[8] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives[J]. Physics of Fluids, 1980,23(12):2362-2372.

[9] Murphy M J, Lee E L, Weston A M, et al. Modeling shock initiation in composition B[C]// Proceeding of the 10th International Detonation Symposium. 1993:786-792.

[10] Vandersall K S, Tarver C M, Garcia F, et al. Shock initiation experiments on PBX9501 explosive at 150℃ for ignition and growth modeling[C]// Proceeding of Shock Compression of Condensed Matter. 2005:1127-1130.

[11] Tarver C M, Lefrancois A S, Lee R S, et al. Shock initiation of the PETN-based explosive LX-16[C]// Proceeding of 13th International Detonation Symposium. 2006:139.

[12] Vandersall K S, Tarver C M, Garcia F, et al. Low amplitude single and multiple shock initiation experiments and modeling of LX-04[C]// Proceeding of 13th International Detonation Symposium. 2006:145.

[13] Urtiew P A, Vandersall K S, Tarver C M, et al. Shock initiation experiments and modeling of composition B and C-4[C]// Proceeding of 13th International Detonation Symposium. 2006:147.

[14] Tarver C M, Chidester S K. Ignition and growth modeling of detonating TATB cones and arcs[C]// Proceeding of Shock Compression of Condensed Matter. 2007:429-432.

[15] Chidester S K, Garcia F, Vandersall K S, et al. Shock initiation experiments plus ignition and growth modeling of damaged LX-04 charges[C]// Proceeding of Shock Compression of Condensed Matter. 2009:271-274.

[16] May C M, Tarver C M. Modeling short shock pulse duration initiation of LX-16 and LX-10 charges[C]// Proceeding of Shock Compression of Condensed Matter. 2009:275-278.

[17] Vandersall K S, Tarver C M, Garcia F, et al. On the low pressure shock initiation of octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine based plastic bonded explosives[J]. Journal of Applied Physics, 2010,107(9):094906.

[18] Hallquist J O. LS-DYNA Theoretical manual[Z]. Livemore Software Technology Corporation, 1998.

[19] Livemore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword user's manual: Version 970[Z]. 2003.

# Numerical method for simulating Steven test based on thermo-mechanical coupled material model

Lou Jianfeng, Zhang Yangeng, Zhou Tingting, Hong Tao

(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing* 100094, *China*)

**Abstract**: In this paper, we figured out a numerical simulation method involving the mechanical, thermal and chemical properties of the Steven test based on the thermo-mechanical coupled material model to simulate the Steven test of the plastic bonded explosive 9501. In this model, the stress-strain relationship is described by the dynamic plasticity model, the impact-induced thermal effect depicted by the isotropic thermal material model, the chemical reaction is described by the Arrhenius reaction rate law, with the effects of heating and melting on mechanical properties and thermal properties of materials also taken into account. Specific to the standard Steven test, the numerical model was validated by comparing the obtained deformation of the target and the ignition threshold of the PBX 9501 with the experimental data in the references. The calculated results are in good agreement with the experimental data, suggesting that this method is capable of simulating the Steven test. Compared to the previous models, this model does not need to incorporate experiential ignition criterion and therefore can be used more widely in the study of thermo-mechanical responses and local ignition of explosives subjected to low velocity impact.

**Keywords**: Steven test; thermo-mechanical coupled model; impact; non-shock initiation

(责任编辑 丁 峰)