

文章编号: 1003-1480 (2004) 02-0016-04

冲击波感度试验 (SSGT) 的 数值模拟

吴曼林, 刘玉存

(华北工学院环境与安全工程系, 山西 太原, 030051)

摘要: 本文用有限元动力学程序对冲击波感度试验 (SSGT) 进行了二维数值模拟。将JWL状态方程和两项式点火增长模型用于小隔板试验中。计算了受主炸药在冲击作用下的压力历史。根据计算得出 HMX/F₂₆₄₁ (密度为 1.81g/cm³) 的隔板值为 6.3~6.4mm。计算结果与试验结果相符合, 数值模拟的结果有效地展现了试验中难于观察的细节过程。

关键词: 炸药; 冲击波感度; 数值模拟

中图分类号: TQ560.72 **文献标识码:** A

Numerical Modeling of Shock Sensitivity Experiments (SSGT)

WU Man-lin, LIU Yu-cun

(North China Institute of Technology, Taiyuan, 030051)

Abstract: The two-dimensional numerical modeling of shock sensitivity experiments is made with a finite element code. The JWL state equation and two-term ignition and growth model are used in small scale gap test. The pressure history inside the acceptor explosives is calculated. The calculated result shows that the gap thickness of HMX/F₂₆₄₁ (1.81g/cm³) is from 6.3mm to 6.4mm. The calculated value is agreement with the experimental result. The result of numerical modeling shows the details which is hard to observe from the experiments.

Key words: Explosive; Shock sensitivity; Numerical modeling

小隔板试验是研究炸药冲击波感度的方法之一, 由于小隔板试验的试验量很大, 因而耗费大量的人力、物力。对小隔板试验进行数值模拟, 不仅可以有效地展现试验中难于观察的细节过程、分析暂时还不清楚的问题, 还能为以后的小隔板试验选择最佳的试验方案, 降低试验的费用, 缩短研究的周期, 甚至可以代替部分试验。本文建立了小隔板试验的力学模型, 采用非线性有限元程序, 将JWL状态方程和两项式点火增长模型用于小隔板试验中, 对炸药的冲击加载过程进行了数值模拟分析,

计算了炸药在冲击作用下的压力历史, 分析了炸药起爆压力阈值。有关研究方法可应用于起爆、传爆序列的设计和模拟仿真研究, 为许多相关课题的研究提供帮助^[1]。

1 小隔板试验

试验采用的小隔板试验装置与NOLSSGT试验装置相当。

试验装置中施主炸药为丙酮精制RDX(3类),

收稿日期: 2003-09-06

作者简介: 吴曼林 (1976-), 女, 硕士研究生, 从事武器系统与运用工程研究。

施主炸药密度为 1.436g/cm^3 ，药柱总高度为 38.15mm ，共分为 7 个药柱，单个药柱的尺寸为 $\Phi 5.10\text{mm} \times 5.45\text{mm}$ ，衰减隔板为标准有机玻璃板，外径为 25mm 。被测炸药（受主炸药）HMX/F₂₆₄₁ 密度为 1.81g/cm^3 （95.5%理论密度时），直径及高度与施主炸药相同，施主及受主炸药均采用强约束，约束套筒材料为 45#钢，外径为 25mm 。

试验中由标准施主炸药爆炸产生的冲击波，经有机玻璃隔板衰减后，作用于被测试样，测定试样 50%起爆概率对应的隔板厚度，即 50%隔板值，用该隔板厚度值比较试样的相对冲击波敏感度。被测试样是否被起爆，根据其末端钢鉴定块上的炸痕深度来判定，若炸痕深度大于零间隙（隔板厚度为 0）时平均炸痕深度的 50%，即判定为起爆，否则判定为起爆失败。

试验测得受主炸药 HMX/F₂₆₄₁ 密度为 1.81g/cm^3 ，其临界起爆压力为 8.26GPa ，隔板值 6.33mm 。

2 数值模拟方法

应用非线性有限元流体动力学方法模拟炸药冲击起爆过程。

材料模型：对有机玻璃隔板采用 Gruneisen 状态方程^[2]，定义压缩材料的压力为：

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (r_0 + a\mu)E \quad (1)$$

膨胀材料的压力：

$$P = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu)E \quad (2)$$

式中 C 是 u_s-u_p 曲线的截距； S_1 、 S_2 、 S_3 是 u_s-u_p 曲线斜率的系数； γ_0 是 Gruneisen 系数； a 是对 γ_0 的一阶体积修正。 C 、 S_1 、 S_2 、 S_3 、 γ_0 和 a 均为输入参数。

对于受主炸药采用二项式点火增长模型和 JWL 状态方程。基础数据来自 PBX-9404 参数^[3]，因为受主炸药的成分和密度接近 PBX-9404，再根据试验结果调整相关参数使之与试验情况相符合，从而确定参数。

二项式点火增长模型^[3]：

$$\frac{dF}{dt} = I(1-F)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G(1-F)^b F^g P^z \quad (3)$$

式中， F 为炸药反应度； t 为时间； ρ 为密度； ρ_0 为初始密度； P 为压力； I 、 G 、 a 、 b 、 x 、 g 、 z 为常数。

对于未反应炸药和炸药爆轰产物的状态方程都采用如下 JWL 形式^[4]：

$$P = A \left(1 - \frac{W}{R_1 v} \right) \exp(-R_1 v) + B \left(1 - \frac{W}{R_2 v} \right) \exp(-R_2 v) + \frac{WE}{v} \quad (4)$$

其中： v 为相对体积； E 为热力学能； A 、 B 、 R_1 、 R_2 及 W 为常数。

3 数值模拟及其结果讨论

小隔板试验中，施主炸药和受主炸药均由 7 个小药柱组成，计算时不考虑药柱之间和单个药柱之间的密度差，将施主炸药和受主炸药分别看作 1 个密度均匀的药柱。试验为轴对称结构，将其简化为二维的轴对称模型，模拟过程从施主炸药开始，以点起爆方式起爆施主药柱。模拟中不考虑钢鉴定块，受主炸药是否被起爆由受主炸药的网格变形和压力变化判断。

图 1 是在 6.3mm 有机玻璃隔板下数值模拟的小隔板试验装置不同时刻的网格变形图。在 $t=0\mu\text{s}$ 时刻以点起爆方式引爆施主炸药，施主炸药在药柱顶端发生非理想爆轰。当 $t=6.0999\mu\text{s}$ 时，施主炸药产生的冲击波已完全进入有机玻璃隔板，而有机玻璃隔板中的冲击波将要进入受主炸药。之后，冲击波沿着受主药柱继续向下传播，炸药开始起爆、产生爆轰。当 $t=13.8\mu\text{s}$ 时，冲击波已传到了药柱的下部，此时受主炸药已经达到稳定的爆轰。 $t=15\mu\text{s}$ 时，受主炸药已反应完，网格完全扩散。有机玻璃隔板的网格变形很大，说明已被炸碎。上下两个套筒的网格发生变形，部分网格已被删除，且受主炸药套筒的网格被删除的比施主炸药套筒的多许多，说明受主炸药比施主炸药的威力大得多。这些与实际的小隔板试验现象基本吻合。图 2 是在 6.4mm 有机玻璃隔板下数值模拟的小隔板试验装置不同时刻的网

格变形图。从 $t=8.9997\mu\text{s}$ 、 $t=11.8\mu\text{s}$ 、 $t=15\mu\text{s}$ 的不同时刻的网格变形图上可以看出受主炸药网格仅顶部有小的变形, 说明炸药没有发生爆轰。

图 3 是受主炸药不同元素位置的示意图, 代表从药柱顶端到下端的不同位置。图 4 是计算的 6.3mm 有机玻璃隔板下受主炸药不同元素的压力历史。当有机玻璃隔板厚为 6.3mm 时, 比 50% 隔板值 6.33mm 略薄, 受主炸药受到的初始冲击波压力必高于 50% 隔板值对应的临界起爆压力, 受主炸药能被起爆。由图 4

中观察, 受主炸药中的冲击波压力在经过几微秒的略微下降后, 在 $13\mu\text{s}$ 时压力升高, 随着爆轰的成长, 压力很快达到 33GPa, 并在以后的距离下基本保持稳定, 达到稳定爆轰。分析炸药在历经几微秒后才达到稳定爆轰的原因, 是因为小隔板试验中通过有机玻璃隔板衰减后的冲击波是一种典型的低压持续脉冲的冲击波。炸药在受到冲击波压力作用后, 在冲击前沿只有部分炸药反应, 炸药最终在前沿后完全反应, 增大了此处的压力峰值。对低压的冲击脉冲, 要在很长

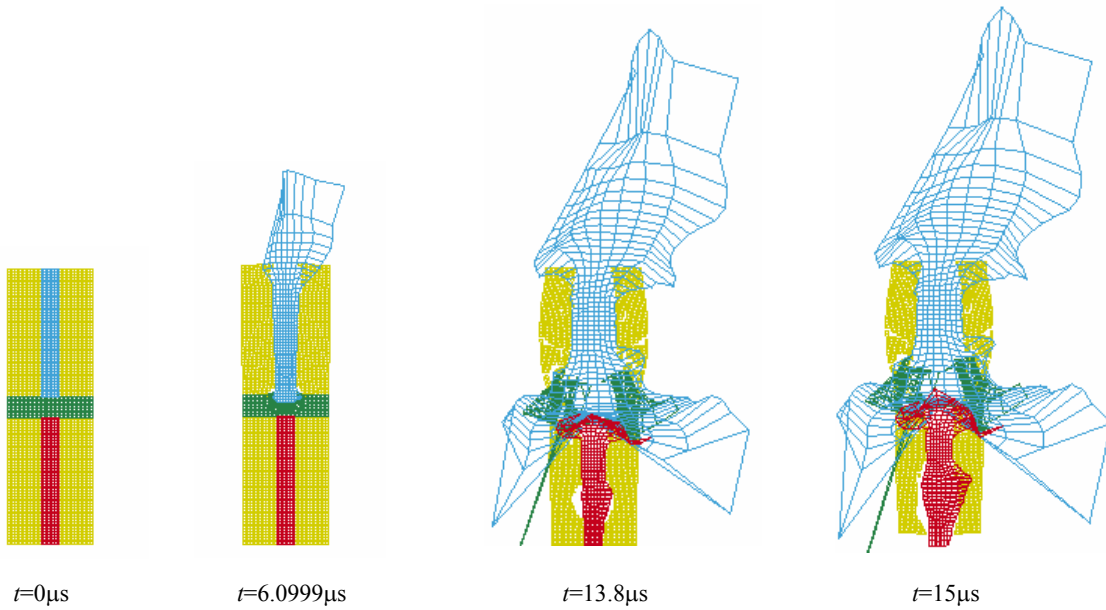


图 1 6.3mm 有机玻璃隔板下不同时刻的网格变形图

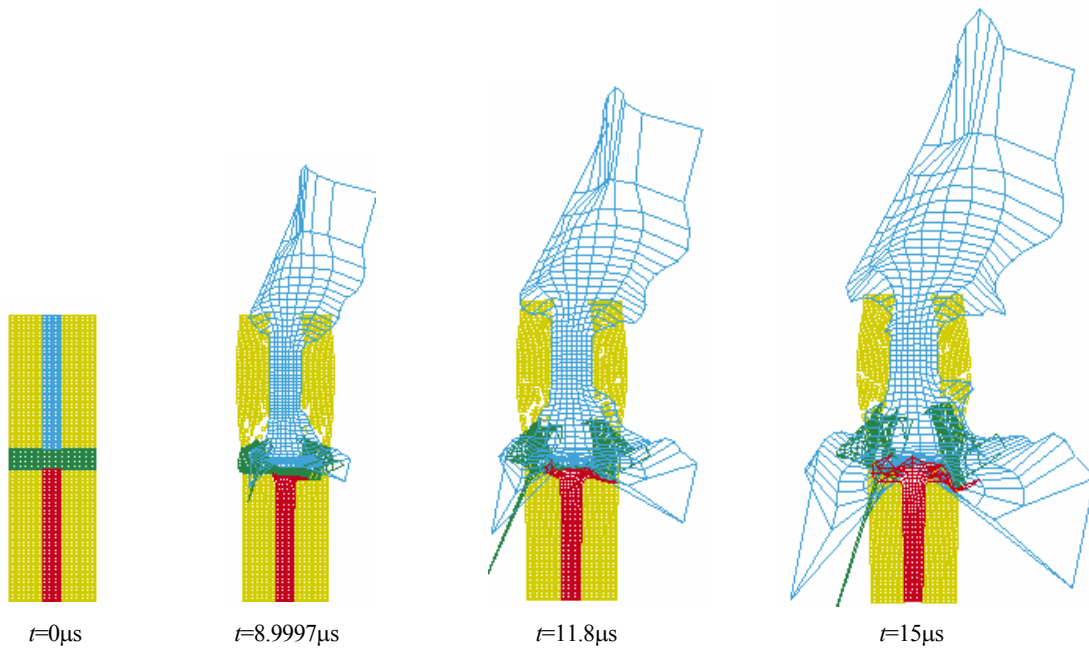


图 2 6.4mm 有机玻璃隔板下, 不同时刻的网格变形图

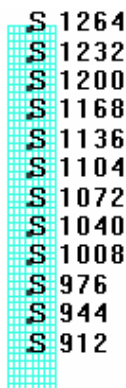


图3 不同元素位置示意图

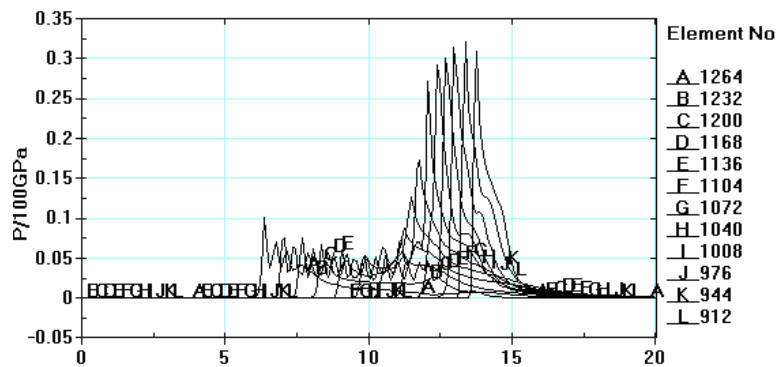


图4 6.3mm有机玻璃隔板下,不同元素的压力时间变化曲线

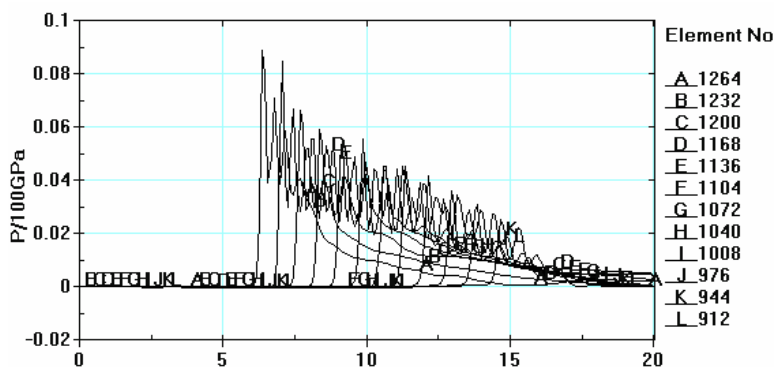


图5 6.4mm有机玻璃隔板下,不同元素的压力时间变化曲线

的反应区才有这样的结果。另外是反应率函数的问题,可能点火增长模型不能有效地表现炸药在临界点时能被起爆并快速发生爆轰的过程。

图5是计算的6.4mm有机玻璃隔板下受主炸药不同元素的压力历史。受主炸药上各元素位置如图4所示。由于有机玻璃厚为6.4mm,比6.30mm的厚,经过隔板传播到受主炸药表面的初始冲击波压力将减小。受主炸药在受到此冲击波压力作用后,顶端的炸药发生了反应,压力达到9GPa左右。由于隔板比50%隔板值6.33mm厚,受主炸药受到的初始冲击波压力低于50%点对应的临界起爆压力,受主炸药不能被起爆,受主炸药在稀疏波作用下压力逐渐衰减。冲击波进入炸药,随着深度的增加,峰值压力也逐渐衰减。

4 结论

通过以上的计算和分析,说明本文的模型较好地反映了冲击波感度试验(SSGT)的情况。计算

得出 HMX/F₂₆₄₁ (密度为 1.81g/cm³) 的隔板值在 6.3mm 到 6.4mm 之间,与试验结果相符合。根据试验结果调整相关参数的数值模拟结果,能够有效地展现试验中难于观察的细节过程。

参考文献:

- [1] 陈朗,冯长根. 固体炸药冲击起爆试验和数值模拟 [C]. 中国兵工学会, 第十一届火工烟火学术年会论文集 2002: 169~174.
- [2] 恽寿榕,徐候杰,梁德寿等著. 爆炸力学计算方法 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [3] M. J. Murphy and E. L. Lee, A. M. Weston, A. E. Williams. Modeling shock initiation in composition B [C]. Tenth symposium (international) on detonation, 1993: 963~970.
- [4] 薛再清. 爆轰产物状态方程及含铝炸药的爆炸过程 [D]. 北京: 北京理工大学机电工程学院, 1998.