

文章编号: 1006-9941(2011)02-0217-04

PBX-9502 炸药爆轰约束三明治试验的数值模拟研究

陈 军¹, 田占东², 张震宇²

(1. 中物院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 国防科技大学理学院技术物理研究所, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 利用形式简单单项爆轰反应速率模型对 PBX-9502 炸药爆轰约束三明治试验进行了数值模拟, 模拟结果与 Alsam 等人爆轰约束三明治试验及相应爆轰冲击动力学(DSD)分析结果的比较表明, 该单项爆轰反应速率模型可以用来准确地模拟爆轰约束三明治实验。在结构一定情况下, 爆轰波阵面的曲率半径与约束材料有关。

关键词: 爆炸力学; PBX-9502 炸药; 爆轰三明治试验; 爆轰反应速率模型

中图分类号: TJ55; O381

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.02.021

1 引 言

爆轰波传播是建立在一定爆轰模型基础上的反应流体动力学问题。爆轰波在有限直径(厚度)炸药装药中的传播与爆轰反应区内的化学反应速率密切相关。爆轰波直径效应由描述近爆轰压力下反应机制的反应动力学决定, 对反应速率方程的函数形式敏感。

国外近年来用三点点火与增长模型、HVRB 和 JTF 等模型在爆轰数值模拟方面做了许多工作, 这几种模型都适合于用来模拟爆轰波的传播问题^[1-2]。然而, 钝感 PBX-9502 炸药在冲击起爆和爆轰波传播期间其反应机制可能存在的差别, 这些模型针对起爆过程的模型参数的物理意义以及参数数值与用于爆轰数值模拟的模型参数的物理意义以及参数数值不同^[3]。即一个模型有两套参数, 它们分别用于冲击起爆和爆轰波传播的计算。

为此, 本研究利用文献[4]的单项爆轰反应速率模型对 PBX-9502 炸药爆轰三明治试验进行了数值计算, 对 PBX-9502 炸药爆轰三明治试验的计算结果与文献中相应的实验及爆轰冲击动力学(DSD)方法分析结果进行了比较, 结果表明该单项爆轰反应速率模型可以用来准确模拟拟定常二维爆轰波的传播过程。

2 计算方法、几何尺寸及材料模型

收稿日期: 2010-06-30; 修回日期: 2010-09-28

基金项目: 国防基础科研计划项目(B1520110002)

作者简介: 陈军(1971-), 男, 研究员, 主要从事爆轰与冲击动力学研究。

e-mail: chenjun@caep.ac.cn

2.1 计算方法与几何尺寸

爆轰约束三明治试验^[5]的基本目的是测量在受惰性材料约束的扁平方形装药中稳定传播的爆轰波波度和爆轰波形状。本研究通过 PBX-9502 的爆轰约束三明治试验^[5](如图 1), 研究利用线平面波发生器起爆传爆药在 PBX-9502 中产生二维平面对称爆轰波传播, 再沿装药中心测量爆轰波速度和爆轰波速度稳定后的爆轰波波面。

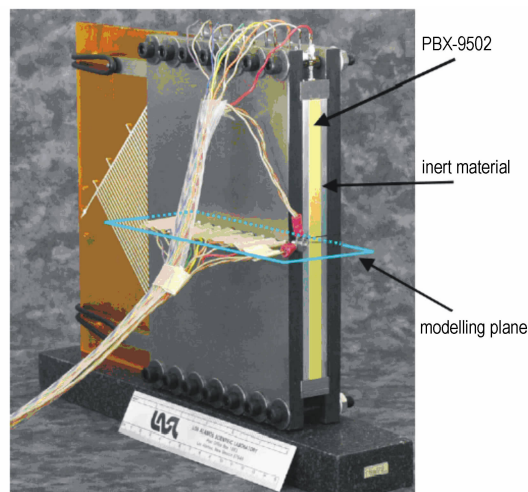


图 1 三明治试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of Sandwich test

因为三明治试验的数值模拟涉及爆轰波与惰性材料的接触以及网格大变形问题, 本研究对三明治试验的数值模拟采用 LS-DYNA 程序的实体单元, 计算网格为纯 Euler 网格, 计算几何模型如图 2 所示。被测

PBX-9502 炸药厚度为 8 mm, 在 z 方向只建一个 Euler 实体网格单元, 对该单元的两个 xoy 平面设置平面对称面条件。在 xoy 平面上的网格单元尺寸为 $0.05 \text{ mm} \times 0.05 \text{ mm}$, 整个计算模型共计 1276000 个单元。起爆方式为传爆药顶端平面起爆, 对传爆药的爆轰计算不涉及化学反应。

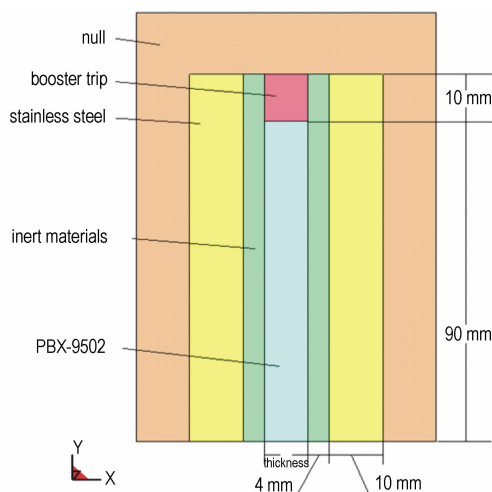


图 2 计算几何模型

Fig. 2 Geometrical model of simulation

2.2 被测炸药材料模型

被测炸药采用带反应流体动力学模型, 未反应炸药及爆轰产物状态方程均为 JWL 状态方程。表 1 中为 Tarver^[1] 给出的 PBX-9502 炸药及其爆轰产物的状态方程参数。

表 1 PBX-9502 炸药及其产物 JWL 状态方程参数

Table 1 JWL equation of state parameters for PBX-9502 explosive & its product

parameters	P_0 /g · cm ⁻³	w_s	A_s /Pa	B_s /Pa	R_1	R_2	C_{vs} /(Pa/K)
PBX-9502	1.895	0.8938	6.3207×10^{13}	-4.472×10^9	11.3	1.13	2.487×10^6
parameters	E_0 /Pa	w_g	A_g /Pa	B_g /Pa	r_1	r_2	C_{vg} /(Pa/K)
detonation products	6.9×10^{-7}	0.5	1.36177×10^{12}	7.199×10^{11}	6.2	2.2	1.0×10^6

模型中的反应速率方程采用文献[4]中的单项爆轰反应速率方程(见式(1)), 该方程及其参数是作者根据 PBX-9502 炸药实验爆轰波粒子速度剖面, 利用高能炸药爆轰反应拉格朗日分析方法确定。文献[4]一维相关数值模拟结果表明, 该形式简单的、单项爆轰

反应速率方程能很好地描述 PBX-9502 炸药爆轰波反应区纵向结构。

$$\frac{d\lambda}{dt} = Gp^z(1-\lambda)^x \quad (1)$$

式中, λ 是反应度, p 是压力, Mbar。炸药常数 z 、 x 和 G 的值分别为 1.973, 1.240, 449.658。

3 计算结果与实验结果、DSD 方法分析结果的比较

3.1 定态爆速

计算中, 在被测炸药中心线上, 从传爆药与被测炸药接触面开始, 每隔 2 mm 取一个节点粒子速度剖面, 根据粒子速度剖面读出每一条粒子速度曲线在爆轰波阵面上的时间值, 可以绘出爆轰波阵面轨迹的 $x-t$ 图。图 3 为试验中两种惰性材料的爆轰波阵面轨迹的 $x-t$ 图, 图中传爆药起爆面的 x 坐标是 0, 传爆药与被测炸药接触面的 x 坐标是 10 mm。利用已知的节点距离 x -时间 t 数据可以得到, 当惰性约束材料为 PMMA 时, 被测 PBX-9502 炸药的定态爆速 D_0 是 $7.294 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; 当惰性约束材料为 Fe 时, 被测 PBX 9502 炸药的定态爆速 D_0 是 $7.373 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

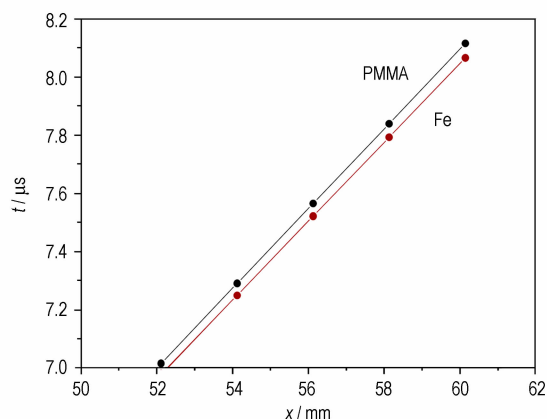


图 3 两种惰性材料的爆轰波阵面轨迹的 $x-t$ 图

Fig. 3 $x-t$ curve of detonation front of two inert material

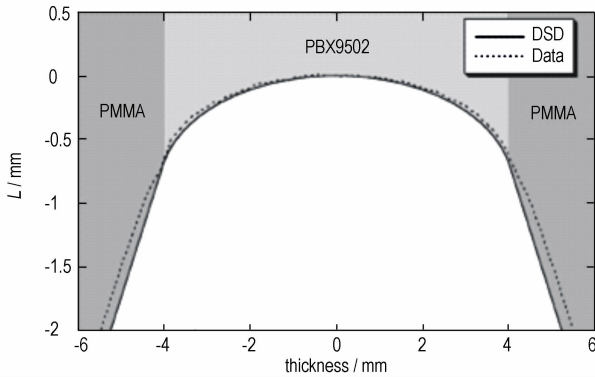
3.2 定态爆速波阵面波形

图 4 给出的是 PBX-9502 炸药样品厚度 8 mm、惰性约束材料为 PMMA 时的定态爆轰波阵面计算结果(图 4b)以及实验结果和 DSD 分析结果(图 4a), 图 5 给出的是惰性约束材料为 Fe 时的计算结果(图 5b)以及实验结果和 DSD 分析结果(图 5a)。图 6 为实验和 DSD 分析波形与计算结果的比较。图中计算波形曲线取波阵面的压力等值线, 并将波阵面中心点坐标置

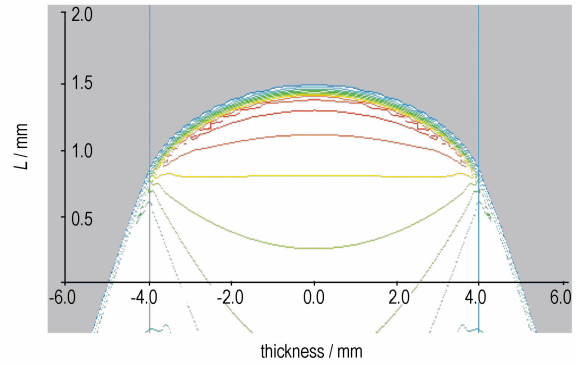
零,图中坐标单位为 mm,实验和 DSD 分析波形取自文献[6]。

显然,对于 Fe 这类强约束材料,边侧稀疏对爆轰波反应有很大影响,边界附近的反应区宽度明显宽于炸药中心处的反应区宽度。所以当惰性约束材料为 PMMA 时,爆轰波波阵面的曲率较大。约束越强,爆轰波阵面曲率越小,定态波速越大。

约束材料,边侧稀疏对位于炸药边界处爆轰波反应有很大影响,边界附近的反应区宽度明显宽于炸药中心处的反应区宽度。所以当惰性约束材料为 PMMA 时,爆轰波波阵面的曲率较大。约束越强,爆轰波阵面曲率越小,定态波速越大。



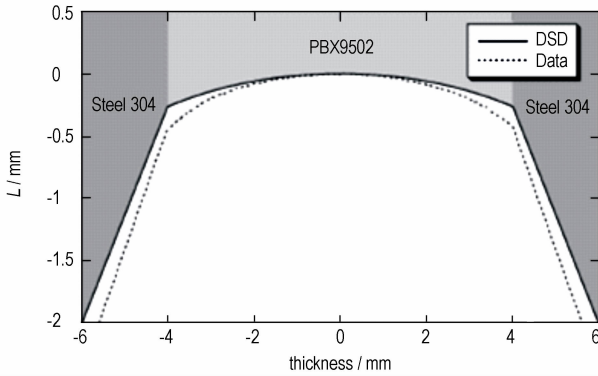
a. results of tests and DSD analysis^[6]



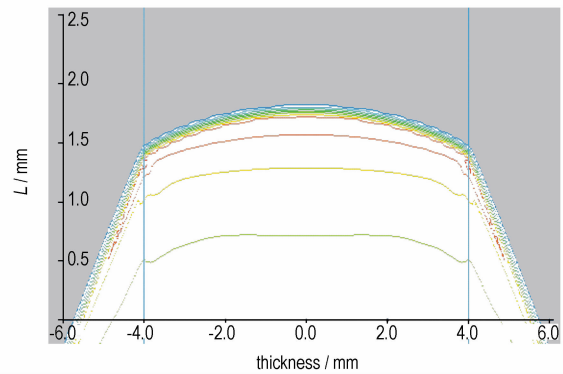
b. simulation results

图 4 惰性约束材料为 PMMA 时的波形

Fig. 4 Shock shapes of PBX-9502 with PMMA confinement



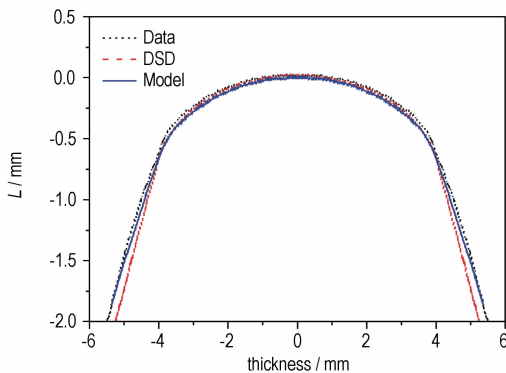
a. results of tests and DSD analysis^[6]



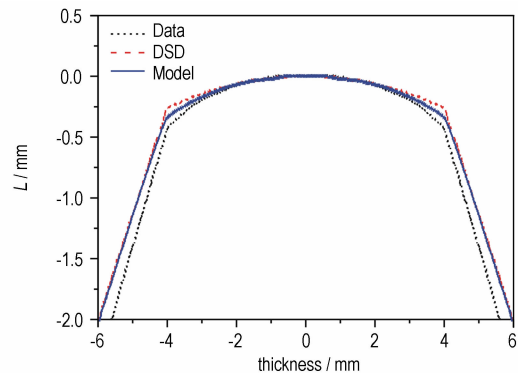
b. simulation results

图 5 惰性约束材料为 Fe 时的波形

Fig. 5 Shock shapes of PBX-9502 with Fe confinement



a. shock shapes of PBX-9502 with PMMA confinement



b. shock shapes of PBX-9502 with Fe confinement

图 6 PBX-9502 炸药的波形比较

Fig. 6 shock shapes of PBX-9502

4 结 论

通过对钝感 PBX-9502 炸药爆轰约束三明治试验数值模拟计算, 可以得出如下结论:

(1) 在带反应流体动力学计算程序中, 利用能很好描述高能炸药爆轰反应区纵向结构的反应速率模型就可以很好地模拟高能炸药的二维爆轰波传播问题;

(2) 在给定炸药装药直径(厚度)的条件下, 爆轰波波阵面的曲率半径与周围惰性材料的约束强度有关。约束越强, 爆轰波阵面曲率越小, 定态波速越大。

参考文献:

- [1] Starkenberg J. Modeling Detonation Propagation and Failure Using Explosive Initiation Models in a Conventional Hydrocode [C]// Proceedings of the 12th Symposium (International) on Det-

onation, 2002.

- [2] Tarver C M, McGuire E M. Reactive Flow Modeling of the Interaction of TATB Detonation Waves with Inert Materials[C]// Proceedings of the 12th Symposium (International) on Detonation, 2002.
- [3] Tarver C M. Ignition and growth modeling of LX-17 hockey puck experiments [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2005 (30): 109-117.
- [4] 陈军, 曾代朋, 张震宇. PBX-9502 炸药爆轰反应模型研究[J]. 高压物理学报, 已录用.
CHEN Jun, ZENG Dai-peng, ZHANG Zhen-yu. A reaction rate model for detonation of PBX-9502. *Chinese journal of High Pressure Physics*, Accepted.
- [5] Hill L G, Aslam T D. The LANL detonation-confinement test: prototype development and sample results[J]. *Shock Compression of Condensed Matter*, 2003.
- [6] Aslam T D, Bdzil J B, Hill L G. Analysis of the LANL Detonation-Confinement Test[J]. *Shock Compression of Condensed Matter*, 2003.

Numerical Simulation of Detonation-confinement Sandwich Test of PBX-9502

CHEN Jun¹, TIAN Zhan-dong², ZHANG Zhen-yu²

(1. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China; 2. Institute of Technical Physics, College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, 410073, China)

Abstract: Detonation-confinement Sandwich Test of PBX-9502 was simulated using a simple one-term reaction rate model. The simulation result was compared with results of tests and detonation shock dynamics (DSD) analysis, it can be found that the reaction rate model can be used to model Detonation-confinement Sandwich Test accurately. The results show that shock shape is dependent on the confined inert material under certain conditions.

Key words: mechanics of explosion; PBX-9502; sandwich test; reaction rate model

CLC number: TJ55; O381

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.02.021



中国化学会第三届全国热分析动力学与热动力学学术会议通知

受中国化学会的委托, 由中国化学会化学热力学和热分析专业委员会和江苏省分析测试协会主办, 江苏省分析测试协会热分析专业委员会、南京师范大学承办、河北师范大学协办的"中国化学会第三届全国热分析动力学与热动力学学术会议(3rd TAKT)"将于2011年10月20-22日在江苏省南京市召开, 会议期间同时召开"江苏省第三届热分析技术研讨会(3rd JTA)". 本次会议将就近年来热分析、热分析动力学和热动力学在理论研究、新仪器设计与分析技术方面的进展以及在无机、有机、高分子、新材料、生物医药等各个领域中的应用进行学术研讨和交流。本次会议将邀请国内、外热分析、热分析动力学、热动力学研究领域的著名专家领衔主讲, 同时, 会议期间还将展示一批国内外最新热分析仪器及相关产品, 提供大量的最新技术、最新测试方法等资料。热忱邀请相关领域的科研、教学的科学工作者和研究生踊跃投稿、与会参加研讨交流。

联系人: 江苏省分析测试协会 汤伟(电话: 025-85485940, 13912996398 传真: 025-85404940);

南京师范大学 王昉(手机: 13851614122);

河北师范大学 张建军(手机: 15533995800)

E-mail: TAKT2011@126.com 会议网页: <http://www.ccs.ac.cn/news/?hid=249>