

PBX-9404 炸药高压反应速率方程的研究^①

张振宇^{a, b} 卢芳云^{a, b} 王志兵^{a, b} 浣石^a

(a. 国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

(b. 中物院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室 绵阳 621900)

摘要 研究了 PBX-9404 炸药在高幅值冲击波加载下的化学反应速率方程。将所得高压反应速率方程与 Johnson 等的经验热点模型的低压项结合, 得到 PBX-9404 炸药的冲击波起爆反应速率模型。利用一维特征线程序模拟该炸药的冲击波起爆过程和爆轰波传播过程。

关键词 PBX-9404 炸药 高幅值冲击波加载 反应速率方程

中图法分类号 O347.4

1 引言

在非均质炸药冲击波起爆的化学反应速率模型中, 大多数以热点的点火和增长概念为基础。用来标定和检验反应速率模型的实验主要是对起爆过程低、中压阶段上进行的拉格朗日量计记录和获得 POP 图实验数据。这样得到的反应速率模型虽然可以很好地重演低、中压加载下的起爆过程, 但是, 它们在描述接近稳定爆轰状态的反应区结构和爆轰波传播的稳定性时, 可能出现明显的偏差。

最后, 我们提出了一种爆轰波反应区流场的拉格朗日分析方法^[1], 根据爆轰波实验动力学参数剖面得到爆轰波反应区整个流场的定量分析结果。利用 PBX-9404 炸药爆轰反应区流场的拉格朗日分析结果, 提出了一种非均质 PBX-9404 炸药高压反应速率方程, 并进行了标定。将所得高压反应速率方程与 Johnson 等的经验热点模型^[2]的低压项结合, 建立了非均质 PBX-9404 炸药的冲击波起爆反应速率模型, 用一维特征线程序对 PBX-9404 炸药的冲击波起爆过程和爆轰波传播过程进行了数值模拟。

2 高压反应速率方程的标定

根据文献[1]中 PBX-9404 炸药爆轰反应区流场的拉格朗日分析结果, 我们提出如下非均质炸药高压反应速率的宏观现象学模型

$$\dot{\lambda}_h = Gp^z(1-\lambda)^x \quad (1)$$

式中: p 为压力; λ 为炸药产物的质量分数; G 、 z 、 x 为待定常数。这些待定常数按如下两条原则确定: (1) 在定常爆轰波波阵面上, 调整(1)式中的常数值, 使 $\dot{\lambda}_h$ 与爆轰波拉格朗日分析结果中反应速率在波阵面上的值相等; 同时, 当冲击波波阵面压力低于 von-Neumann 尖峰压力时, 用(1)式拟合 Forest-Fire 反应速率随冲击波波阵面压力变化曲线。按照 ZND 模型的假设, 在冲

^① 张振宇: 男, 1959 年 3 月生, 硕士, 副教授。
1998-07-17 收到原稿, 1999-04-20 收到修改稿。

击波波阵面上 $\lambda=0$ 。因此,由这两个条件可以定出(1)式中常数 G 和 z 。(2)定出 G 值和 z 值后,将爆轰反应区拉格朗日分析结果 $p(t)$ 和 $\lambda(t)$ 代入(1)式中,选择 $(1-\lambda)$ 的指数 x ,使(1)式描述的高压反应速率在定常爆轰条件下的时间剖面 $\dot{\lambda}_h(t)$ 与爆轰波拉格朗日分析结果 $\dot{\lambda}(t)$ 尽量重合,从而定出 x 值。我们确定出的(1)式中的待定常数值分别为: $G = 4394.0 (1/(\mu\text{s} \cdot 10^2\text{Pa}))$, $z = 3.4$, $x = 1.3$ 。

图1用实线和细虚线分别给出了 Forest-Fire 反应速率和(1)式定义的高压反应速率随冲击波波阵面压力变化的曲线,图中粗虚线给出的是下面由(3)式定义的低压反应速率随波阵面压力变化曲线。在图2所示的两条曲线中,实线为爆轰反应区拉格朗日分析结果,虚线为我们所给出的 $\dot{\lambda}_h(t)$ 曲线。

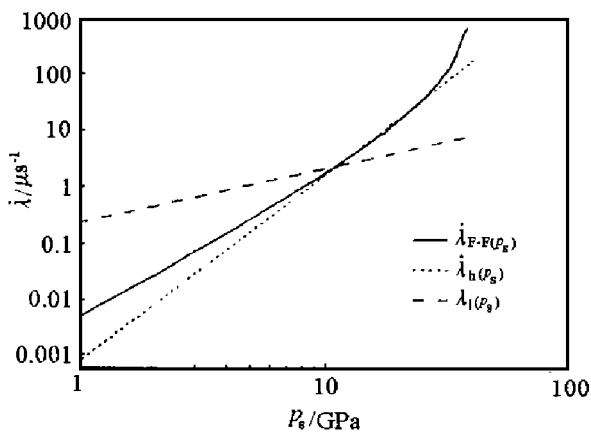


图1 反应速率随冲击波波阵面压力变化曲线
Fig.1 Reaction rate as function of shock pressure

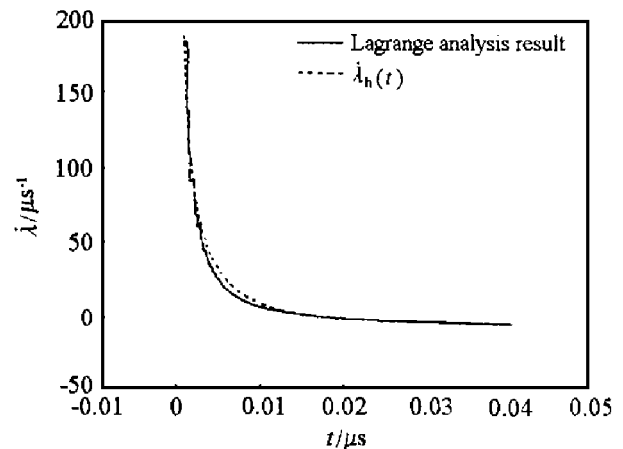


图2 $\dot{\lambda}_h(t)$ 与爆轰反应区中拉格朗日分析结果
Fig.2 $\dot{\lambda}_h(t)$ and Lagrange analysis result for flow field in detonation reaction zone

显然,(1)式所表示的高压反应速率方程,在形式上与 Tarver^[3] 和 Kim^[4] 提出的三项式点火与增长模型中描述反应快速完成的第三项相同。但是,在物理概念上,它们有着本质上的区别。首先,我们提出的高压反应速率方程描述了在高幅值冲击波作用下,包括热点反应在内的整个反应过程,而不是只描述热点反应快完成时,燃烧由热点向外到向颗粒内部传播的拓扑学转换。其次,在常数的标定上,由于(1)式中的 G 值是根据高幅值冲击波波阵面上的反应速率定出,它代表高压点火常数。第三,在通常的点火与增长模型中, p^z 项代表了与冲击波压力有关的层状燃烧速率。在低压下表征炸药中薄层燃烧速率的压力指数 z 一般取 1.0。Lee 在他的文章中提到^[5],有些实验证明,在较高的压力下,压力指数会突然增高至 2.0。因此, Tarver 等在他们的三项式反应速率方程中,第三项的压力指数取了 2.0。我们认为在接近定常爆轰的高幅值冲击波作用下,化学反应速率与波阵面压力 p_s 的关系更密切,压力指数 z 主要反映了炸药颗粒被强冲击波粉碎的程度。第四,由于 $(1-\lambda)$ 的指数只控制反应速率在波阵面后的过程,较大的 x 值表明,在高压下由于炸药颗粒被不同程度的粉碎,燃烧表面进入炸药的初始颗粒之中,燃烧表面积与炸药颗粒体积之比迅速增加,因而,由表面燃烧机制控制的分解速率大大增加。

3 冲击波起爆反应速率模型

由于非均质炸药在幅值足够高的冲击波作用下,其化学反应机制与定常爆轰波反应机制相同,由定常爆轰波拉格朗日分析得到的高压反应速率方程可以用来描述非均质炸药在较高幅值冲击波作用下的化学反应过程。但是,在较低幅值冲击波作用下,大量实验表明,化学反应的主要部分在波阵面后一定距离处开始,因此,(1)式不能用来描述低幅值冲击波波阵面后的化学反应。为了能同时描述非均质 PBX-9404 炸药在不同幅值冲击波作用下的化学分解反应,我们假设 PBX-9404 炸药的冲击波反应速率方程为

$$\dot{\lambda} = \dot{\lambda}_l + \dot{\lambda}_h \quad (2)$$

式中,右边第二项为(1)式表示的高压反应速率方程,第一项为 Johnson 等的经验热点模型中的低压项^[2],即

$$\dot{\lambda}_l = \dot{f} \quad (3)$$

其中

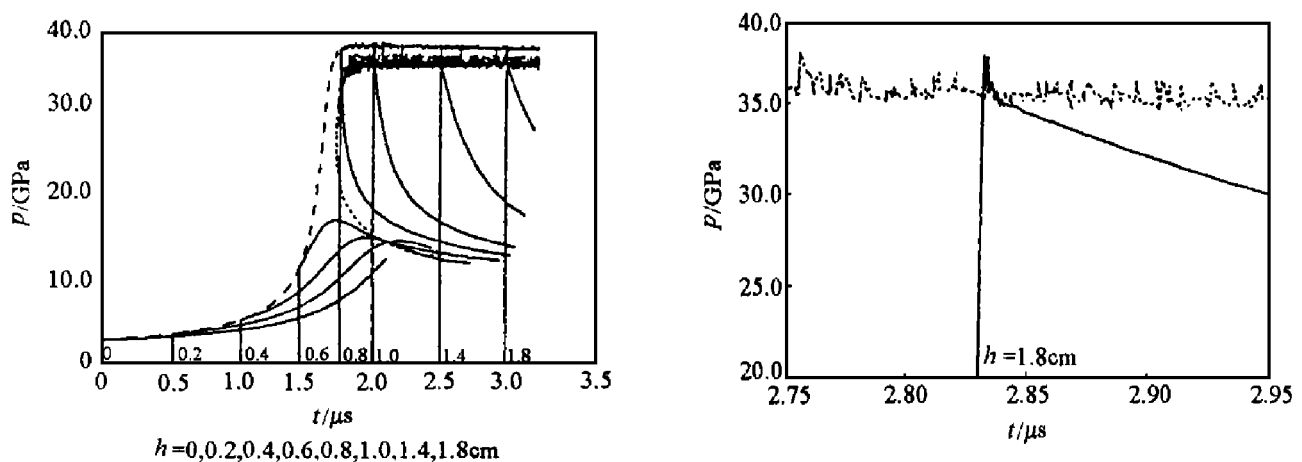
$$\dot{f} = (1 - \lambda)Z(\alpha\beta/\theta_s^2)\exp(-\alpha/\theta_s) \quad (4)$$

$\dot{\lambda}_l$ 和 $\dot{\lambda}_h$ 分别在低幅值冲击波和高幅值冲击波作用下起主要作用。

4 冲击波起爆和爆轰波传播的一维数值模拟

为了比较,我们在自己编制的一维带反应流动力学特征线程序 CSIN 中,加入了 Forest-Fire 模型、Johnson 等的经验热点模型和本文中提出的高、低压两项反应速率模型,用这三种模型对厚铝板以 600m/s 的速度撞击 PBX-9404 炸药引起的冲击波起爆过程进行了计算,撞击界面压力约 3.0GPa。计算结果分别如图 3~图 6 所示。

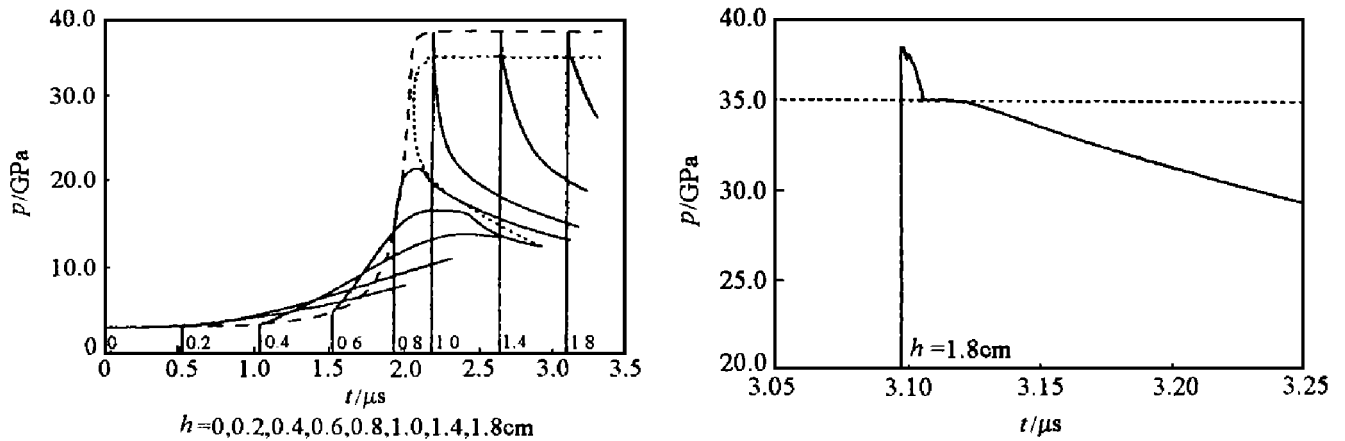
计算中所用 PBX-9404 炸药及其产物的 JWL 状态方程参数和 Forest-Fire 模型参数取自文献[6], Johnson 模型的参数取自文献[2]。



(a) 不同拉格朗日质点的压力剖面
(a) $p(t)$ at different Lagrange position

(b) $h = 1.8$ cm 拉格朗日位置的压力剖面
(b) $p(t)$ at Lagrange position of 1.8 cm

图 3 Forest-Fire 模型结果
Fig.3 The results of Forest-Fire model

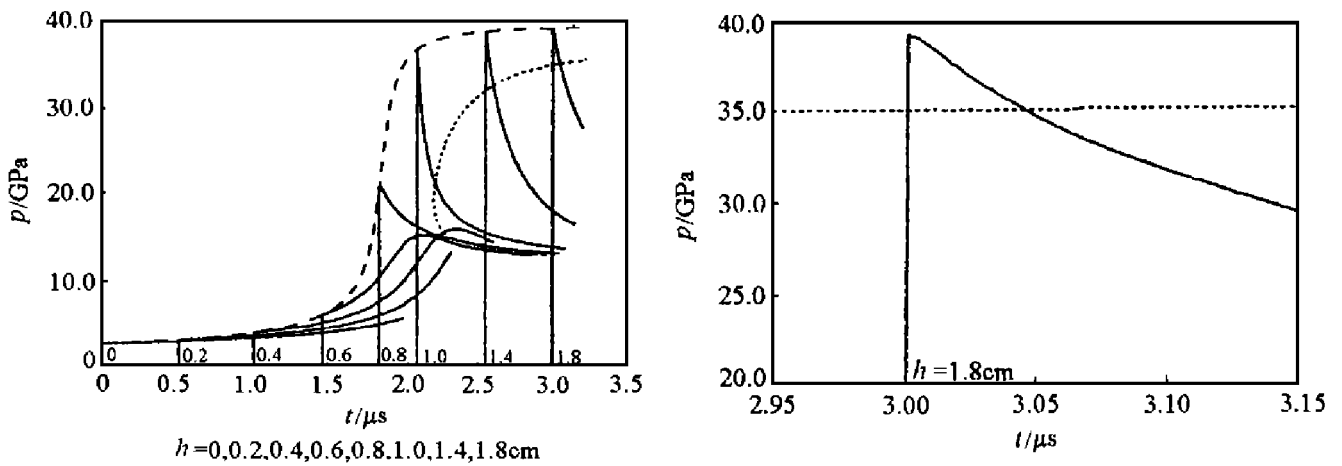


(a) 不同拉格朗日质点的压力剖面
(a) $p(t)$ at different Lagrange position

(b) $h = 1.8$ cm 拉格朗日位置的
(b) $p(t)$ at Lagrange position of 1.8 cm

图 4 Johnson 的经验热点模型结果

Fig.4 The results of Johnson's empirical hot-spot model



(a) 不同拉格朗日质点的压力剖面
(a) $p(t)$ at different Lagrange position

(b) $h = 1.8$ cm 拉格朗日位置的
(b) $p(t)$ at Lagrange position of 1.8 cm

图 5 本文给出的反应速率模型结果

Fig.5 The results of our model proposed in this paper

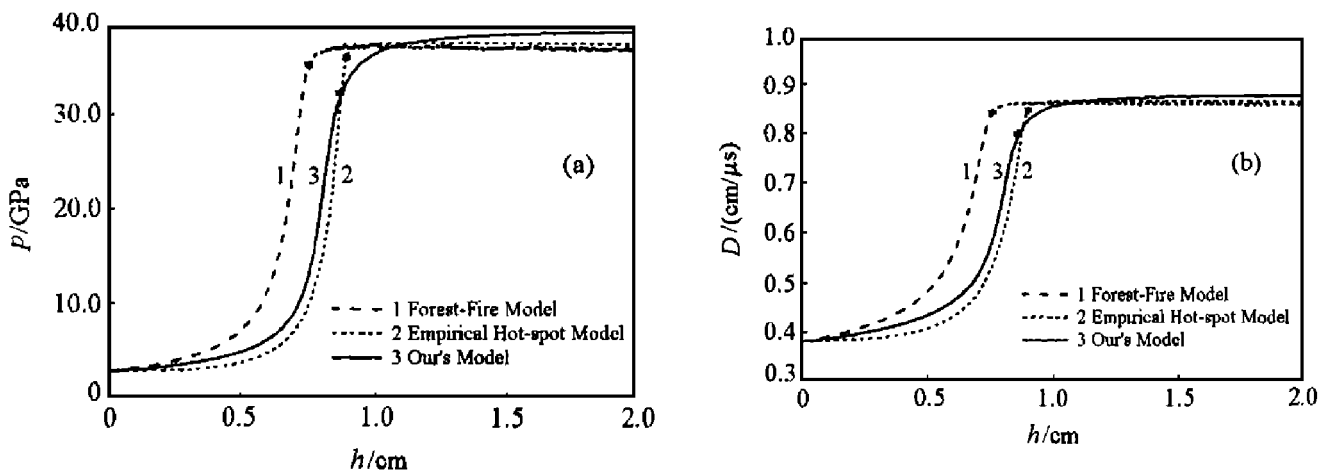


图 6 波阵面压力和冲击波速度随冲击波到达位置变化曲线

Fig.6 Shock pressure and shock velocity as function of shock position

5 结 论

根据图 3 ~ 图 6 所示计算结果, 本文给出的 PBX-9404 炸药冲击波起爆反应速率模型, 可以较好地描述 PBX-9404 炸药的冲击波起爆过程。由于我们的高压反应速率模型得自实验结果, 在描述爆轰波的传播时, 给出的高、低压两项模型结果不论在波形上、反应区宽度上, 还是在 VN 点和 CJ 点的压力幅值上, 都与实验结果最接近。而且爆轰波传播的稳定性也非常好。

参 考 文 献

- 1 张振宇, 浣石, 卢芳云, 等. 高能炸药爆轰波反应区流场的拉格朗日分析方法. 爆炸与冲击, 1996, 16(3): 271 ~ 277
- 2 Johnson J N, Tang P K, Forest C A. Shock Wave Initiation of Heterogeneous Reactive Solid. Journal of Applied Physics, 1985, 57(9): 4323
- 3 Tarver C M, Hallquist J O, Erickson L M. Modeling of Short Pulse Duration Shock Initiation of Explosives. In: 8th Symposium (International) on Detonation. Maryland: Naval Surface Weapons Center, 1986. 884
- 4 Kim K, Sohn C H. Modeling of Reaction Build-up Processes in Shocked Porous Explosives. In: 8th Symposium (International) on Detonation. Maryland: Naval Surface Weapons Center, 1986. 641
- 5 Lee E L, Tarver C M. Phenomenological Model of Shock Initiation in Heterogeneous Explosives. Physics of Fluids, 1980, 23(12): 2362
- 6 章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆动力学. 北京: 国防工业出版社, 1989

STUDIES ON HIGH-PRESSURE REACTION RATE OF PBX-9404

Zhang Zhenyu^{a, b}, Lu Fangyun^{a, b}, Wang Zhibing^{a, b}, Huan Shi^a

(a. Department of Applied Physics, National University of Defense Technology, Changsha, 410073)

(b. Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research,
Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang, 621900)

ABSTRACT The chemical reaction rate of PBX-9404 for high shock loading has been developed in this paper. This high-pressure reaction rate combined with the low-pressure term of Johnson's empirical hot-spot rate result in a new shock initiation model for heterogeneous PBX-9404 explosive. According to this model, we have simulated the process of shock initiation and detonation wave propagation of PBX-9404 by means of a one-dimensional characteristic code.

KEY WORDS PBX-9404 explosive, high amplitude shock loading, reaction rate